

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Eero Rinne

Lumen ominaisuuksien mittaus tutkalla

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 6.6.2005

Työn valvoja

Professori Martti Hallikainen

Työn ohjaaja

TkL Marko Mäkynen

Tekijä:	Eero Rinne	
Työn nimi:	Lumen ominaisuuksien mittaus tutkalla	
Päivämäärä:	6. kesäkuuta 2005	Sivumäärä: 69
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professori:	S-92 Avaruustekniikka	
Työn valvoja:	Professori Martti Hallikainen	
Työn ohjaaja:	TkL Marko Mäkinen	
<p>Tässä diplomityössä tutkitaan mikroaaltotutkan soveltuvuutta lumen kaukokartoitukseen. Tehdyt analyysit perustuvat Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratorion helikopterikäyttöisellä HUTSCAT-sirontamittarilla vuosina 2002-2005 Tuusulan koealueella tehtyyn mittauskampanjaan. Työssä esitellään tutkamittauksen teoriaa sekä tutkamittauksen kannalta tärkeitä lumen ominaisuuksia. Työssä esitellään myös HUTSCAT-sirontamittari sekä sillä tehtyjä aiempia lumeen liittyviä tutkimuksia.</p> <p>Kampanjan aikana tehtiin mittauksia lumen ollessa kuivaa, kosteaa ja märkää. Myös täysin lumetonta maata mitattiin. Kampanjan tuloksina esitetään mitattu sirontakerroin yleisen lumitilanteen, lumen vesiaron, lumen sekä maan lämpötilojen ja lumen deformaation funktiona. Lisäksi tarkastellaan erilaisten maastotyyppien vaikutusta lumen kaukokartoitukseen. Työssä pohditaan myös erilaisten mittauskulmien (23° ja 45°), taajuuksien (5,4 GHz ja 9,8 GHz) sekä polarisaatioiden (HH, VV, HV ja VH) soveltuvuutta lumen kaukokartoitukseen.</p> <p>Tässä työssä todetaan tutkan soveltuvan yleisen lumitilanteen kaukokartoitukseen Etelä-Suomen alueella. Sulamiskauden alkamisella todetaan olevan vaikutusta mitattuun sirontaker-toimeen. Kuivan tai kostean lumipeitteen vesiärvolla, lämpötilalla tai deformaatiolla ei havaita olevan vaikutusta sirontakertoimeen. Sen sijaan maanpinnan lämpötilan ja sirontakertoimen välillä havaitaan kohtalainen negatiivinen korrelaatio.</p> <p>Tätä työtä on rahoittanut Euroopan Unionin ympäristö- ja kestävän kehityksen ohjelma, sopimusnumero EVG1-CT-2001-00052 EnviSnow.</p>		
Avainsanat:	lumi kaukokartoitus tutka sironta HUTSCAT	

Author:	Eero Rinne		
Name of the Thesis:	Measuring of snow characteristics using radar		
Date:	6 June 2005	Number of pages:	69
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering		
Professorship:	S-92 Space Technology		
Supervisor:	Professor Martti Hallikainen		
Instructor:	Marko Mäkynen, Lic. tech.		
<p>This Master's thesis concerns the applicability of radar measurement to remote sensing of snow. The analysis presented in this work are based on an airborne measurement campaign with HUTSCAT-scatterometer in Tuusula boreal forest test site. The campaign was carried out by the Laboratory of Space Technology of Helsinki University of Technology during the years 2002-2005. This work presents the basic theory of scatterometric remote sensing measurement and physical properties of snow relevant to a scatterometric measurement. The HUTSCAT-instrument is introduced as well as previous snow research and results.</p> <p>Measurements were made in snow free, dry, moist and wet snow conditions. Snow depth varied from 0 to 100 cm. Measured backscattering coefficients are presented as a function of general snow condition, snow water equivalent and the temperatures of snow and underlying soil. This work also considers the suitability of various measurement angles (23° and 45° off nadir), frequencies (5,4 GHz and 9,8 GHz) and polarizations (HH, VV, HV and VH) to radar remote sensing of snow.</p> <p>Radar measurement is found out to be suitable for determination of snow conditions in Southern Finland. Melting season is found to have an effect on the measured backscattering coefficient. Properties of snow layer such as snow water equivalent, temperature of snow or deformation of snow are found to have no effect on the backscattering coefficient. Instead a negative correlation between the backscattering coefficient and underlying ground temperature is discovered.</p> <p>This work has been supported by the EU Environment and Sustainable Development Programme under contract EVG1-CT-2001-00052 EnviSnow.</p>			
Keywords:	snow remote sensing radar scattering HUTSCAT		

Alkulause

Merkittävä osa tätä diplomityötä oli lentomittauskampanja, jonka aikana helikopterin moottorissa paloi reilu kuutio kerosiinia. Lennoilla tehtyjä mittauksia analysoidessa taas kului noin sata litraa kolajuomaa. Kolasta suurin osa oli sitruunaesanssilla maustettua. Kolan lisäksi käytin piristeenä myös kahvia sekä rentoutumiseen olutta. Juodun kahvin tai oluen määrää on vaikea arvioida, koska siitä ei ole työpisteessä muistona röykkiötä tyhjiä pulloja. Suuruusluokka lienee kuitenkin satoja litroja. Kaiken kulutetun polttoaineen ja jalon juoman hedelmä on käsissäsi oleva opinnäytetyö, joka päättää kuuden vuoden teekariaikani. Uskon, että tässä esitetystä tutkimuksesta on enemmän hyötyä ilmastolle, kuin helikopterilla lentämisestä on ollut sille haittaa.

Tätä työtä on tehdessä on ollut hauskaa. Kiitos siitä kuuluu avaruustekniikan laboratorion ainutlaatuiselle ilmapiirille sekä siellä työskenteleville hienoille ihmisille. Työn hauskuutta on omalta osaltaan lisännyt Helikopterikeskus Oy:n kanssa tehty loistavasti sujunut yhteistyö. Kiitokset kuuluvat myös ihmisille, jotka ovat säännöllisesti jaksaneet tiedustella työn etenemistä. Tärkeimpinä näistä ihmisistä tässä mainittakoon tyttöystäväni Paula sekä veljeni Timo — heidän tukensa ja kannustuksensa on ollut suureksi avuksi, tietenkin muillakin elämän aloilla kuin opiskelussa.

Erityisen kiitoksen ansaitsevat tämän työn ohjaaja assistentti Marko Mäkynen sekä työn valvoja, professori Martti Hallikainen. Heiltä olen saanut mielenkiintoisen ja haastavan aiheen sekä neuvoja tutkijan työn tekemiseen. Huomattavin kiitos on kuitenkin annettava professori Hallikaiselle tokaisusta:

”En halua enää sähköpostia, haluan nähdä tuloksia.”

Tulokset alkavat sivulta 36.

Otaniemessä, 2. kesäkuuta 2005.



Eero Rinne

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Alkulause	iv
Sisällysluettelo	v
Symboli- ja lyhenneluettelo	vii
1 Johdanto	1
2 Tutkamittauksen teoriaa	3
2.1 Tutkayhtälö	3
2.2 FM-CW-tutkan toimintaperiaate	5
2.3 Sironta lumipeitteestä	8
2.3.1 Lumen fysikaaliset ominaisuudet	8
2.3.2 Lumen permittiivisyys	9
2.3.3 Sirontakertoimen muodostuminen	10
2.4 Mittausparametrien vaikutus sirontakertoimeen	16
3 HUTSCAT-sirontamittari	19
3.1 Laitteen esittely	19
3.2 Mittauksen geometria	20
3.3 Tarkkuus	21
4 Aiemmat lumitutkimukset	23

4.1	Vuosien 1991-1993 HUTSCAT-kampanjat Sodankylässä	23
4.2	HUTSCAT ja ERS-1	24
4.3	Ulkomaiset lumitutkimukset	24
5	EnviSnow -mittauskampanja	26
5.1	Tuusulan koealue	26
5.2	Mittauslennot	29
5.3	Maastomittaukset	30
5.4	Sirontakertoimien laskeminen	31
5.5	Lumiolosuhteet	33
5.5.1	Märkä lumi	33
5.5.2	Kuiva lumi	34
5.5.3	Kostea lumi	34
5.5.4	Lumeton maa	35
6	Lumipeitteen ja maanpinnan vaikutus sirontaan	36
6.1	Lumipeitteen vaikutus	41
6.1.1	Lumen vesi-arvo	50
6.1.2	Deformoitunut lumi	53
6.1.3	Lumen lämpötila	56
6.2	Maanpinnan vaikutus	58
6.2.1	Maanpinnan lämpötila	59
6.3	Metsän vaikutus	62
6.4	Mittausgeometrian vaikutus	62
7	Yhteenveto	65
	Lähdeluettelo	67

Symboli- ja lyhenneluettelo

A	Pinta-ala
A_{rs}	Tehollinen pinta-ala
B	Kaistanleveys
G	Antennin vahvistus
G_0	Antennin maksimivahvistus
G_n	Antennin normalisoitu vahvistus
G_{ts}	Vahvistus vastaanottavan antennin suuntaan
I	Valaisuintegraali
$I_n(\Theta_0, R)$	Normalisoitu valaisuintegraali
P_R	Vastaanotettu teho
P_T	Lähetetty teho
R	Etäisyys
Γ	Tehon heijastuskerroin
Θ_0	Mittauskulma
Θ_{3dB}	Antennin kolmen desibelin keilanleveys
δ	Tunkeutumissyvyys
ϵ_0	Tyhjön permittiivisyys $= 8,8542 \cdot 10^{-12}$
ϵ_r	Aineen suhteellinen permittiivisyys $\epsilon_r = \epsilon'_r - j \cdot \epsilon''_r$
λ	Aallonpituus
ρ_s	Lumen tiheys
σ	Sirontapoikkipinta
σ^0	Differentiaalinen sirontakerroin, sirontakerroin
τ	Lumen tilavuussironnan albedo
c	Valon nopeus tyhjössä
d	Lumipeitteen paksuus
f	Taajuus

f_a	Absorbointikerroin
f_{IF}	FM-tutkan välitaajuus
f_M	FM-tutkan modulaatiotaajuus
h	Lentokorkeus
k_0	Vapaan tilan aaltoluku
m_v	Nestemäisen veden osuus lumen tilavuudesta
t_r	Modulaation nousu- ja laskuaika
t_{rt}	Edestakaiseen matkaan kulunut aika
AIRSAR	NASAn lentokonekäyttöinen SAR-tutka
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar - Envisat-satelliitin SAR-tutka
C-alue	IEEE:n taajuusjaon mukainen taajuusalue 4-8 GHz
EFHE	Hernesaaren helikopterilentopaikka
EFHK	Helsinki-Vantaan lentoasema
Envisat	Eurooppalainen kaukokartoitussatelliitti
ERS	European Remote Sensing satellite — eurooppalainen kaukokartoitussatelliitti
ESA	Euroopan avaruusjärjestö
FFT	Fast Fourier Transform — nopea fouriermuunnos
FM-CW-tutka	Taajuusmoduloitu kantoaaltotutka
GPS	Global Positioning System
KKJ	Kartastokoordinaattijärjestelmä
NASA	National Aeronautics and Space Administration — Yhdysvaltain kansallinen avaruushallinto
SCA	Snow Covered Area — lumen peittoala
SIR-C/X-SAR	Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar
SWE	Snow Water Equivalent — lumen vesiarvo
TEKES	Tekniikan kehittämiskeskus
WGS84	World Geodetic System
X-alue	IEEE:n taajuusjaon mukainen taajuusalue 8-12 GHz

Luku 1

Johdanto

Lumi peittää talvisin pohjoisesta pallonpuoliskosta laajimmillaan yli 40 miljoonaa neliökilometriä [1]. Viime vuosikymmenten aikana maailmanlaajuinen ilmastomuutos, erityisesti ilmaston lämpeneminen, on vaikuttanut lumipeitteeseen ja sen vuotaiseen vaihteluun [2]. Koska lumi heijastaa auringosta tulevaa energiaa eri tavalla kuin paljas maa, lumipeite vaikuttaa allaan olevan maan sekä päällään olevan ilman lämpötilaan [3]. Lumipeitteen muutokset kytkeytyvät koko ilmaston tilaan, sekä vaikuttaen ilmastoon että toimien ilmaston tilan indikaattorina. Maailmanlaajuiset, luotettavat kartat lumipeitteen vaihtelusta auttaisivat ilmastomuutoksen seuraamisessa ja sen mekanismien ymmärtämisessä [1].

Vesivoima on pohjoismaissa tärkeä energiantuotannon muoto. Vesivoimalaitosten juoksutusten optimointiin sulamiskaudella tarvitaan ajantasaista tietoa laajojen alueiden lumitilanteesta. Lumen sulamisvedet aiheuttavat myös tulvia, joiden ennustaminen mahdollistaa niiden tehokkaamman hallinnan ja vahinkojen ennaltaehkäisyn. Vuoristoissa lumivyöryt vaativat ihmishenkiä vuosittain — ainakin osa onnettomuuksista voitaisiin ehkäistä tarkemmilla lumivyöryennusteilla. [4]

Perinteisesti lumitilannetta seurataan paikan päällä maastossa tehtävin mittauksin. Maastossa tehtävien mittausten huonot puolet ovat niiden hitaus, niiden tekemiseen vaadittava suuri työmäärä sekä huono paikallinen kattavuus. Maastomittausten vahvuus on niillä saavutettava suuri tarkkuus.

Kaukokartoituksella tarkoitetaan kohteen ominaisuuksien mittaamista matkan päästä, itse kohdetta koskematta. Kaukokartoitus perustuu mitattavan kohteen emittoimien tai sirottamien sähkömagneettisten aaltojen mittaukseen. Yleensä kaukokartoituslaite on kohteen päällä lentävässä lentokoneessa tai satelliitissa. Kaukokartoituksen avulla voidaan mitata hyvinkin suuria alueita nopeasti ja edullisesti. Satelliitti-instrumenteilla voidaan kattaa koko maapallon pinta muutamissa päivissä.

Kaukokartoitusinstrumentit voidaan karkeasti jakaa käytetyn sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuden mukaan optisella alueella ja mikroaaltoalueella toimiviin laitteisiin. Optisen alueen laitteet tarvitsevat yleensä toimiakseen auringonvaloa, joten niillä voidaan mi-

tata vain päiväsaikaan. Mikroaaltoalueella toimivilla laitteilla, joihin tässä työssä käytetty tutka kuuluu, vastaavaa rajoitusta ei ole. Myös pilvet häiritsevät optisen alueen mittauksia huomattavasti enemmän kuin tutkaa.

Tässä työssä tutkitaan tutkamittauksen soveltuvuutta lumen ominaisuuksien kaukokartoitukseen. Lisäksi tutkitaan, soveltuvatko jotkut taajuudet ja polarisaatiot toisia paremmin lumen kaukokartoitukseen. Tehdyt analyysit perustuvat Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratorion HUTSCAT-sirontamittarilla vuosina 2002-2005 tehtyihin mittauksiin. Mittauskampanja oli osa Euroopan Unionin rahoittamaa EnviSnow-projektia. EnviSnow-projektin päätavoite on kehittää ja testata uusia menetelmiä lumipeitteen ja maan ominaisuuksien mittaamiseksi erilaisilla kaukokartoituslaitteilla. [4]

Luvussa 2 käsitellään tutkamittauksen teoriaa sekä lumipeitteen vaikutusta tutkan mittaamaan sirontakertoimeen. Luvussa 3 esitellään tässä työssä käytetty HUTSCAT-sirontamittari ja luvussa 4 sillä aiemmin tehtyjä lumipeitteen kaukokartoitukseen liittyviä tutkimuksia. Luvussa 5 kuvaillaan mittauskampanja sekä datan keruu. Luvussa 6 esitetään mittauskampanjan tulokset sekä niistä tehdyt johtopäätökset. Lyhyt yhteenveto tehdystä työstä on luvussa 7.

Luku 2

Tutkamittauksen teoriaa

Tässä luvussa käsitellään tutkamittauksen teoriaa. Aluksi esitellään sirontamittauksessa mitattavat suureet sekä niihin vaikuttavat tekijät. Seuraavaksi käsitellään tässä työssä käytetyn FM-CW -tutkan rakennetta. Lopuksi käsitellään lumipeitteen sirontaan vaikuttavia lumen ominaisuuksia sekä lumen peittämän maan sirontakertoimen muodostumista.

2.1 Tutkayhtälö

Sirontamittaustilannetta kuvataan tutkayhtälöllä [5]:

$$P_R = \frac{\lambda^2 P_T G^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}, \quad (2.1)$$

missä P_R on vastaanotettu teho, P_T on tutkan lähettämä teho, G on antennin vahvistus kohteen suuntaan, λ on tutkan lähettämän kantaallon aallonpituus, R on tutkan ja kohteen välinen etäisyys sekä σ kohteen *sirontapoikkipinta*, joka määritellään:

$$\sigma = A_{rs}(1 - f_a)G_{ts}, \quad (2.2)$$

missä A_{rs} on kohteen tehollinen pinta-ala, f_a on kohteen absorboima osa siihen osuneesta tehosta ja G_{ts} on kohteen vahvistus vastaanottavan antennin suuntaan.

Kaukokartoituksessa sirontamittarin antennin keilan alueelle osuu yleensä useita sirottajia. Tällöin sirontapoikkipinta-alan sijasta kohteen sirontaa kuvataan suureella *differentiaalinen takaisinsirontakerroin*, lyhyesti *sirontakerroin* σ^0 . Sirontakerroin määritellään sirontapoikkipinnan differentiaalina fyysisen pinta-alan A suhteen [6]:

$$\sigma^0 = \frac{d\sigma}{dA}. \quad (2.3)$$

Sirontakerroin kuvaa siis keskimääräistä sirontapoikkipintaa fysikaalista pinta-alayksikköä kohden. Sijoittamalla σ^0 yhtälöön 2.1 saadaan tämä muotoon:

$$P_R = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_A \frac{P_T G^2 \sigma^0}{R^4} dA. \quad (2.4)$$

Jos antennin keila on kapea, lähetysteho P_T ja sirontakerroin σ^0 voidaan olettaa vakioiksi antennin keilan valaisemalla alueella. Tällöin sirontakertoimen arvoksi saadaan:

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi)^3}{\lambda^2} \frac{P_R}{P_T} \frac{1}{\int_A \frac{G^2}{R^4}}. \quad (2.5)$$

Sirontakertoimen laskeminen tietyllä aallonpituudella tehdystä tutkimuksesta edellyttää siis vastaanotetun ja lähetetyn tehon tuntemista. Lisäksi pitää tuntea *valaisuintegraali*:

$$I(\Theta, \phi, R) = \int_A \frac{G^2}{R^4} dA. \quad (2.6)$$

Valaisuintegraali riippuu siis kohteen etäisyydestä ja antennin säteilykuviosta. Oletetaan, että säteilykuvio on symmetrinen niin, ettei se riipu kulmasta ϕ . Valaisuintegraali voidaan nyt lausua antennin normalisoidun vahvistuksen avulla, jolloin:

$$I(\Theta, R) = G_0^2 \int_A \frac{G_n^2(\Theta)}{R^4} dA = G_0^2 I_n(\Theta_0, R), \quad (2.7)$$

jossa Θ_0 on kohteen ja antennin pääkeilan maksimisuunnan välinen kulma, G_0 on antennin maksimivahvistus, $G_n(\Theta)$ on antennin normalisoitu vahvistus, Θ on alkion dA ja antennin pääkeilan maksimin välinen kulma ja $I_n(\Theta_0, R)$ on *normalisoitu valaisuintegraali*. Sirontamittarin G_0 sekä I_n ovat mittausta tehtäessä tunnettuja laitteen parametreja.

Hyvä likiarvo normalisoidulle valaisuintegraalille saadaan mittaamalla antennin normalisoidut vahvistukset eri suuntiin antennin keskilinjasta ja olettamalla, että antennin suunta-kuvio on pyörähdyssymmetrinen. Mitattaessa tasomaista pintaa kohtisuoraan projisoituu pinnalle ympyröitä, joiden kaarella sekä antennin vahvistus G_n että mittausetäisyys R ovat vakioita. Tällöin voidaan laskea kahden vakiovahvistusympyrän rajoittaman renkaan nauhan pinta-ala sekä laskea likiarvo kaavan 2.7 pintaintegraalille [7]:

$$I_n(\Theta_0, R) = \sum_i \frac{G_{ni}^2(\Theta_i) A_i}{R_i^4} \cos(\Theta_0), \quad (2.8)$$

jossa:

- G_{ni} on antennin normalisoitu vahvistus nauhan kohdalla

- Θ_i on kulma antennin keskilinjan ja renkaan nauhan keskipisteen välillä. Kulma Θ_i saa arvot $\Theta_i = i\Delta\Theta, i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$
- R_i on etäisyys nauhan keskipisteeseen $R_i = \frac{h}{\cos(\Theta_i)}$
- A_i on nauhan pinta-ala:

$$A_i = \begin{cases} \pi h^2 \tan^2(\frac{1}{2}\Delta\Theta) & \text{kun } i = 0 \\ \pi h^2 \left(\tan^2(\Theta_i + \frac{1}{2}\Delta\Theta) - \tan^2(\Theta_i - \frac{1}{2}\Delta\Theta) \right) & \text{kun } i \geq 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Mitä pienemmillä väleillä $\Delta\Theta$ antennin suuntakuvio on mitattu, sitä pienempi on saadun likiarvon virhe.

Edellistä karkeampi likiarvo normalisoidulle valaisuintegraalille saadaan olettamalla antennin normalisoidun G_{in} vahvistuksen olevan yksi antennin kolmen desibelin keilanleveyden Θ_{3dB} sisäpuolella ja nolla sen ulkopuolella. Tällöin tietyllä lentokorkeudella h tiettyyn mittaussuuntaan Θ_0 saadaan normalisoidun valaisuintegraalin arvoksi [8]:

$$I(\Theta_0, h) = \frac{\pi \Theta_{3dB}^2 \cos(\Theta_0)}{4h^2}. \quad (2.10)$$

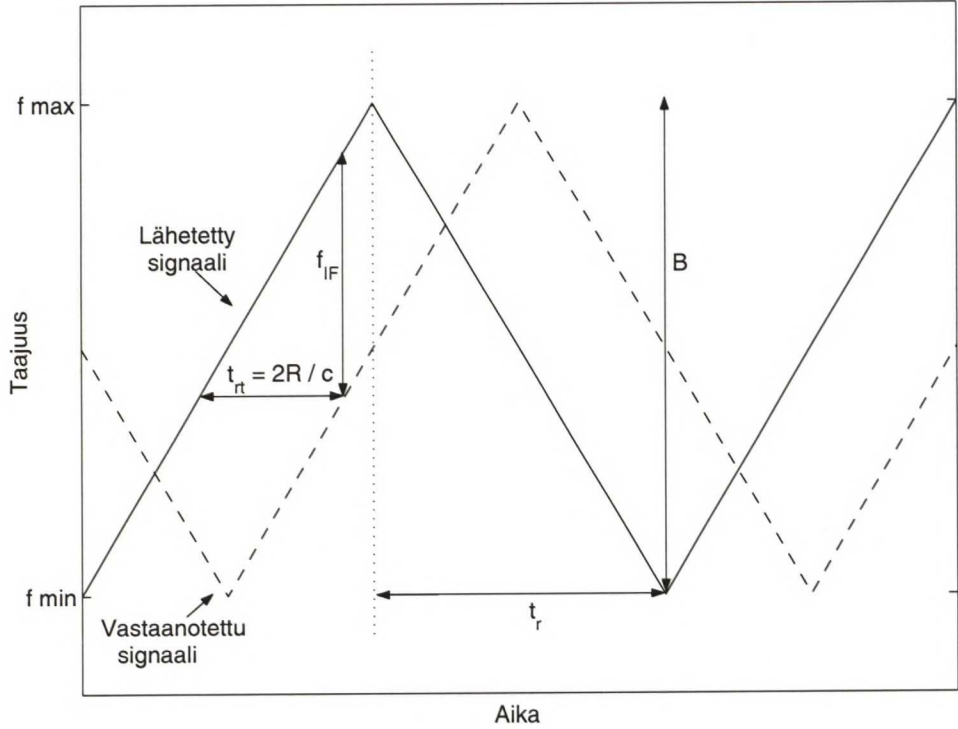
Sähkömagneettisen aallon polarisaatiolla tarkoitetaan aallon sähkökenttävektorin suuntaa ajan kuluessa. Jos ajan kuluessa sähkökenttävektorin suunta ei muutu, puhutaan lineaarisesti polarisoituneesta aallosta eli *lineaaripolarisaatiosta*. Jos sähkökenttävektorin suunta on horisontaalitasossa, puhutaan *horisontaalipolarisaatiosta* H . Vastaavasti jos sähkökenttävektorin suunta on vertikaalitasossa, puhutaan *vertikaalipolarisaatiosta* V . Tutkamittauksessa voidaan valita, millaisella polarisaatiolla sähkömagneettista säteilyä lähetetään ja vastaanotetaan. Jos tutka sekä lähettää että vastaanottaa samaa polarisaatiota (VV tai HH), puhutaan yhdensuuntaispolarisaatioista. Jos taas signaali vastaanotetaan eri polarisaatiolla kuin millä se on lähetetty, on kyseessä ristipolarisaatio (HV tai VH).

2.2 FM-CW-tutkan toimintaperiaate

FM-CW-tutka eli taajuusmoduloitu kantoaaltotutka (Frequency Modulated Carrier Wave) lähettää vakioamplitudista, taajuudeltaan muuttuvaa sinimuotoista signaalia [5]. Taajuusmoduloidun tutkan etu tavalliseen CW-tutkaan nähden on, että FM-CW-tutkalla saadaan mitattua myös kohteen etäisyys. Yleensä lähetystaajuutta moduloivana signaalina käytetään jatkuva-aaltoista lineaarista kolmioaaltosignaalia [17]. Lähetetyn ja vastaanotetun signaalin taajuuksien ero riippuu kohteen etäisyydestä. Taajuuseron muodostuminen on esitetty kuvassa 2.1.

Kuvasta 2.1 voidaan yhdenmuotoisten kolmioiden avulla johtaa yhteys välitaajuuden f_{IF} , modulaatiotaajuuden f_M , kaistanleveyden B sekä kohteen etäisyyden R välille:

$$\frac{B}{t_r} = \frac{f_{IF}}{t_{rt}}, \quad (2.11)$$



Kuva 2.1: Taajuusmoduloinnin periaate

jossa t_r on modulaation nousu- ja laskuaika (katso kuva 2.1):

$$t_{rt} = \frac{1}{2f_M} . \quad (2.12)$$

Etäisyydellä R olevasta kohteesta siroonnut signaali palaa tutkaan ajan t_{rt} kuluttua. Koska signaalin etenemisnopeus on c , saadaan t_{rt} :n arvoksi:

$$t_{rt} = \frac{2R}{c} . \quad (2.13)$$

Sijoittamalla nämä yhtälöön 2.11 saadaan välitaajuudeksi:

$$f_{IF} = \frac{4RBf_M}{c} . \quad (2.14)$$

Tästä saadaan edelleen ratkaistua tiettyä välitaajuutta vastaava kohteen etäisyys:

$$R = \frac{cf_{IF}}{4Bf_M} . \quad (2.15)$$

Taajuudella f_{IF} ilmaistusta vastaanotetun ja lähetetyn tehon suhteesta $\frac{P_R}{P_T}$ voidaan siis laskea etäisyydellä R antennista olevan alkion differentiaalin sirontakerroin σ^0 , kunhan tiedetään tutkan antennin maksimivahvistus G_0 ja normalisoitu valaisuintegraali $I_n(\Theta_0, R)$.

Sirontamittauksen tarkkuus riippuu tarkkuudesta, jolla mittalaitteen parametrit tunnetaan. Usein on hyödyllistä kalibroida sirontamittari mittaamalla kohdetta, jonka sirontapoikkipinta-ala tai sirontakerroin tunnetaan tarkasti. Tällaista kalibrointia kutsutaan sirontamittarin *ulkoiseksi kalibroinniksi* [8]. Kalibrointikohteina käytetään esimerkiksi erilaisia metallilevyjä, kulmaheijastimia tai linsejä. Kalibrointikohteena voidaan käyttää myös aktiivista tutkakalibraattoria. Aktiivinen tutkakalibraattori on laite, joka vastaanottaa tutkan lähettämän pulssin, vahvistaa sitä ja lähettää sen takaisin tutkan suuntaan. [7]

Mitattaessa etäisyydellä R_c olevaa tunnettua kalibrointikohdetta, jonka sirontapoikkipinta-ala on σ_c , saadaan tutkayhtälön 2.1 vastaanotetuksi tehoksi P_{RC} :

$$P_{RC} = \frac{\lambda^2 P_T G_0^2 \sigma_c}{(4\pi)^3 R_c^4}. \quad (2.16)$$

Kun tunnetaan tarkasti mitattavan kohteen tutkapoikkipinta σ_c , voidaan määrittää kaavan 2.5 vakiotekijöiden suhde:

$$K = \frac{(4\pi)^3}{\lambda^2 P_T G_0^2}. \quad (2.17)$$

Yhdistämällä kaavat 2.16 ja 2.17 saadaan:

$$K = \frac{\sigma_c}{P_{RC} R_c^4}. \quad (2.18)$$

Ulkoisen kalibroinnin lisäksi sirontamittari voidaan kalibroida mittaamalla mahdollisimman tarkasti eri osien ominaisuudet. Tätä kutsutaan sirontamittarin *sisäiseksi kalibroinniksi*. Sisäisellä kalibroinnilla pyritään määrittämään sirontakertoimen kaavassa 2.5 oleva vastaanotetun ja lähetetyn tehon suhde $\frac{P_R}{P_T}$ tai eliminoidaan lähettimen ja vastaanottimen lämpötilan aiheuttamat tehotason muutokset. Sisäinen kalibrointi voidaan tehdä jokaiselle osalle erikseen tai ohjaamalla lähettimen lähettämä teho P_T tai tietty osa siitä viivelinjan kautta vastaanottimeen [8].

Viivelinjakalibroinnin tarkoituksena on määrittää, mikä osa mitatun vastaanotetun tehon P_R muutoksesta johtuu mittaushetkestä ja mikä mittalaitteen komponenttien ominaisuuksista, esimerkiksi ilmaisimen epälineaarisuudesta tai erilaisten komponenttien lämpötilariippuvuudesta. Kun tunnetaan tarkasti lämpötilan vaikutus käytettyjen viivelinjan sekä tehonjakajien vaimennuksiin, voidaan viivelinjan läpi suoraan vastaanottimeen syötetystä tehosta erottaa lähten- ja vastaanotinpiirien aiheuttama vaimennus. Lämpötilamuutoksen aiheuttama tehomuutos desibeleinä on kahden eri lämpötilassa mitatun viivelinjan läpi kulkeneen tehon erotus vähennettynä osuudella, joka johtuu viivelinjapiirin vaimennuksen muuttumisesta.

2.3 Sironta lumipeitteestä

Tässä luvussa esitellään lumen fysikaalisia ja sähkömagneettisia ominaisuuksia. Erityistä huomiota kiinnitetään niihin fysikaalisiin ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat tutkasignaalin siroamiseen lumipeitteestä. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi:

- Nestemäisen veden määrä m_v
- Lumen vesiarvo SWE
- Lumen tiheys ρ_s
- Lumen kidekoko
- Lumipeitteen rakenne
- Lumipeitteen pinnan muoto
- Lumen lämpötila

2.3.1 Lumen fysikaaliset ominaisuudet

Lumi on ilman ja jäätyneen veden seos. Jäätynyt vesi on lumessa *lumikiteinä*. Osa lumen sisältämästä vedestä voi olla myös nestemäisessä muodossa. Kun nestemäistä vettä ei ole, puhutaan kuivasta lumesta. Muulloin puhutaan märästä tai kosteasta lumesta. Lumen kosteutta kuvataan yleensä nestemäisen veden prosentuaalisella osuudella lumen tilavuudesta m_v . Luonnossa nestemäisen veden osuus vaihtelee kuivan lumen nolasta prosentista nuoskalumen noin viiteen prosenttiin. [9]

Lumen vesiarvolla SWE kuvataan lumen määrää. SWE voidaan ymmärtää sellaisen vesipatsaan korkeudeksi, joka syntyy lumen sulaessa. SWE määritellään lumen tiheyden integraalina lumipeitteen paksuuden matkalla, eli:

$$SWE = \int_0^d \rho_s dz, \quad (2.19)$$

jossa ρ_s on lumen tiheys [g/cm^3] ja d on lumipeitteen paksuus. Mitatun lumen vesiarvon ja lumipeitteen paksuuden välillä on yleensä vahva korrelaatio.

Lumen raekoolla tarkoitetaan lumikiteen tyypillistä halkaisijaa. Yleensä lumessa on eri kokoisia kiteitä, jolloin raekooksi ilmoitetaan mediaaniarvo. Joskus on tarkoituksenmukaista ilmoittaa myös maksimiarvo.

Luonnollisen lumipeitteen rakenne on erityisesti Etelä-Suomessa hyvin harvoin tasainen. Lumipeitteessä on yleensä erilaisia kerroksia, joiden tiheys, kosteus ja raekoko eroavat

toisistaan. Kerroksia voi syntyä esimerkiksi lumen osittain sulaessa ja uudelleen jäätyessä. Eri aikoihin talven aikana satava lumi muodostaa myös erilaisia kerroksia. Tällaista lumipeitettä kutsutaan deformatuneeksi. Deformaatiokerrokset lumipeitteen sisällä vaikeuttavat lumipeitteen sirontakertoimen mallinnusta huomattavasti.

2.3.2 Lumen permittiivisyys

Aineen permittiivisyys on aineen rakenteesta riippuva kompleksinen vakio. Permittiivisyys on kompleksinen suure, joka yleensä ilmoitetaan suhteessa tyhjän permittiivisyyteen ϵ_0 [10]:

$$\epsilon = \epsilon_0(\epsilon'_r - j \cdot \epsilon''_r), \quad (2.20)$$

jossa ϵ'_r on suhteellisen permittiivisyyden reaaliosa sekä ϵ''_r suhteellisen permittiivisyyden imaginaariosa.

Lumen suhteellinen permittiivisyys ϵ_{sn} riippuu pääosin kolmesta muuttujasta: lumipeitteen tiheydestä, lumen sisältämän nestemäisen veden määrästä sekä taajuudesta, jolla permittiivisyys mitataan.

Kuivan lumen permittiivisyys ϵ_{ds} riippuu ainoastaan lumen tiheydestä ρ_s . Hyvä kokeellinen approksimaatio kuivan lumen permittiivisyyden reaaliosalle on [9]:

$$\epsilon'_{ds} = \begin{cases} 1,0 + 1,9\rho_s & \text{kun } \rho_s \leq 0,5g/cm^3 \\ 0,51 + 2,88\rho_s & \text{kun } \rho_s \geq 0,5g/cm^3 \end{cases} \quad (2.21)$$

Kuivan lumen suhteellisen permittiivisyyden imaginaariosan ϵ''_{ds} ja jään permittiivisyyden imaginaariosan ϵ''_i suhteen on vastaavasti havaittu riippuvan ainoastaan lumen tiheydestä [11]:

$$\frac{\epsilon''_{ds}}{\epsilon''_i} = 0,52\rho_s + 0,62\rho_s^2. \quad (2.22)$$

On kuitenkin huomattavaa, että vaikka kaavan 2.22 suhde riippuu vain lumen tiheydestä, on ϵ''_i taajuuden funktio [11].

Märän lumen permittiivisyys ϵ_{ws} riippuu tiheyden ρ_{sn} lisäksi myös nestemäisen veden määrästä m_v sekä käytetystä taajuudesta [12]:

$$\epsilon'_{ws} = A + \frac{Bm_v^x}{1 + (f/f_0)^2} \quad (2.23)$$

$$\epsilon''_{ws} = \frac{C(f/f_0)m_v^x}{1 + (f/f_0)^2}, \quad (2.24)$$

joissa:

$$\begin{aligned}
 A &= 1,0 + 1,83\rho_{ds} + 0.02A_1m_v^{1,015} + B_1 \\
 B &= 0,073A_1 \\
 C &= 0,073A_2 \\
 x &= 1,31 \\
 f_0 &= 9,07 \text{ GHz} \\
 A_1 &= A_2 = 1 \text{ ja } B_1 = 0, \text{ kun } f < 15 \text{ GHz}.
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Yhtälöistä 2.23-2.25 nähdään, että märän lumen permittiivisyyden ja nestemäisen veden määrän riippuvuus on muotoa:

$$\epsilon_{ws} = D + Em_v^{1,3}, \tag{2.26}$$

jossa E ja D ovat taajuuden ja lumen tiheyden funktioita. Märän lumen permittiivisyys riippuu siis voimakkaasti nestemäisen veden määrästä.

Tunkeutumissyvyydellä tarkoitetaan matkaa, jonka kuljettuaan sähkömagneettisen aallon amplitudi on vaimentunut $1/e$ osaan alkuperäisestä. Sähkömagneettisen aallon *tunkeutumissyvyys* δ pienenee permittiivisyyden imaginaariosan kasvaessa [8]:

$$\delta = \frac{\lambda_0}{2\pi |Im[\sqrt{\epsilon_r}]|}. \tag{2.27}$$

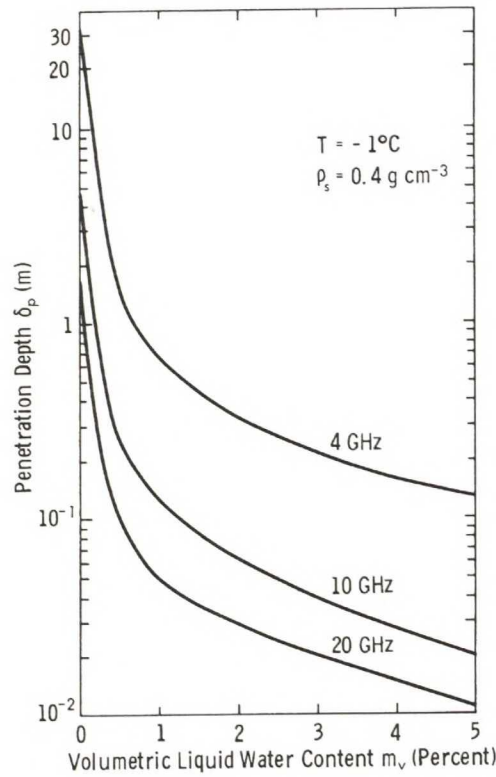
Kuvassa 2.2 on esitetty tunkeutumissyvyys eri taajuuksille lumen kosteuden funktiona. Täysin kuivalle lumelle tunkeutumissyvyys on useita metrejä, kun taas märälle lumelle se on kymmenen sentin luokkaa. Tunkeutumissyvyys pieneminen vaikuttaa takaisinsirontaan.

2.3.3 Sirontakertoimen muodostuminen

Tutkasironta luonnollisen lumen peittämästä maasta on monimutkainen ja vaikeasti mallinnettava tapahtuma. Lumen peittämän maan sirontakertoimen on todettu riippuvan monista muuttujista. Näitä ovat lumen sisältämän nestemäisen veden määrä, lumipeitteen paksuus, ilma-lumi- sekä lumi-maa -rajapintojen muoto, lumikiteiden koko ja muoto, lumen lämpötilaprofiili, lumen tiheysprofiili sekä lumipeitteen kerrosrakenne [9] [16]. Lumen ominaisuuksien lisäksi sirontakertoimeen vaikuttavat myös maanpinnan ominaisuudet, erityisesti sen kosteus ja lämpötila. Myös laitteen parametrit, kuten taajuus, mittauskulma ja käytetty polarisaatio, vaikuttavat mitattuun sirontakertoimeen. [14]

Lumen peittämän maan sirontakerroin σ^0 muodostuu yleisessä tapauksessa kolmesta osasta [8]:

A Takaisinsironnasta ilman ja lumen rajapinnasta, σ_A^0 ,



Kuva 2.2: Laskettu sähkömagneettisen aallon tunkeutumisvyvyys lumen kosteuden funktiona eri taajuuksilla (Ulaby et al. 1982).

B lumen tilavuussironnasta, σ_B^0 ,

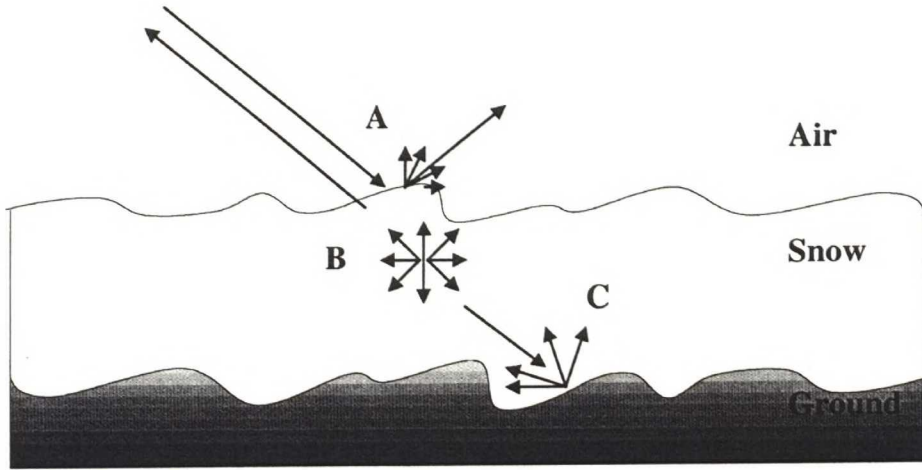
C sironnasta lumen ja maanpinnan rajapinnasta, σ_C^0 .

Kokonaissirontakerroin voidaan esittää näiden summana, eli [8]:

$$\sigma^0 = \sigma_A^0 + \sigma_B^0 + \sigma_C^0. \quad (2.28)$$

Kuva 2.3 havainnollistaa sirontakertoimen muodostumista yleisessä lumen peittämän maan tapauksessa.

Kuivan lumen tapauksessa ϵ_{ds} ja ϵ_0 ovat samaa suuruusluokkaa. Tällöin ilman ja lumen välisen rajapinnan tehon heijastuskerroin Γ on pieni. Luonnolliselle kuivan lumen ja ilman rajapinnalle $\Gamma \leq 0,08$ [9]. Näin ollen suurin osa tehosta läpäisee rajapinnan, ja sironta ilman ja lumen rajapinnasta menettää merkityksensä. Tällöin myöskään lumipeitteen epätasaisuus ei vaikuta sirontakertoimeen. Kuivalle lumelle merkittävä osa kokonaissironnasta muodostuu tilavuussironnasta lumipeitteen sisällä. [6] Loput sironnasta muodostuu lumipeitteen alapuolisen maan ja lumipeitteen rajapinnassa sekä tilavuussironnasta maan sisällä.



Kuva 2.3: Sähkömagneettisen signaalin sironta lumipeitteestä (Koskinen, 2001)

Kuten edellisessä alaluvussa on todettu, lumen kostuessa tunkeutumisvyvyys δ pienenee. Tutkasignaalin vaimentuessa voimakkaasti jo lyhyellä matkalla muut sirontamekanismit kuin sironta lumi-ilma -rajapinnasta menettävät merkityksensä, koska signaali ei pääse tunkeutumaan lumipeitteen yläosaa syvemmälle. Tällöin lumipeitteen paksuudella tai alla olevalla maalla ei ole vaikutusta sirontakertoimeen σ^0 . Täysin kuivan lumipeitteen läpi tutkasignaali etenee helposti useita metrejä, jolloin sirontaan vaikuttavat myös lumipeitteen sisäiset ominaisuudet sekä alla olevan lumi-maa -rajapinnan ominaisuudet. Kuva 2.4 havainnollistaa eri sirontamekanismien merkitystä kokonaissirontakertoimen muodostumisessa lumipeitteen kostuessa.

Tarkastellaan aluksi kuivan lumipeitteen vaikutusta sirontakertoimeen. Kuivan lumipeitteen tilavuussirontaa voidaan mallintaa käyttämällä Rayleigh-approksimaatiota pallomaisille siroittajille [6]:

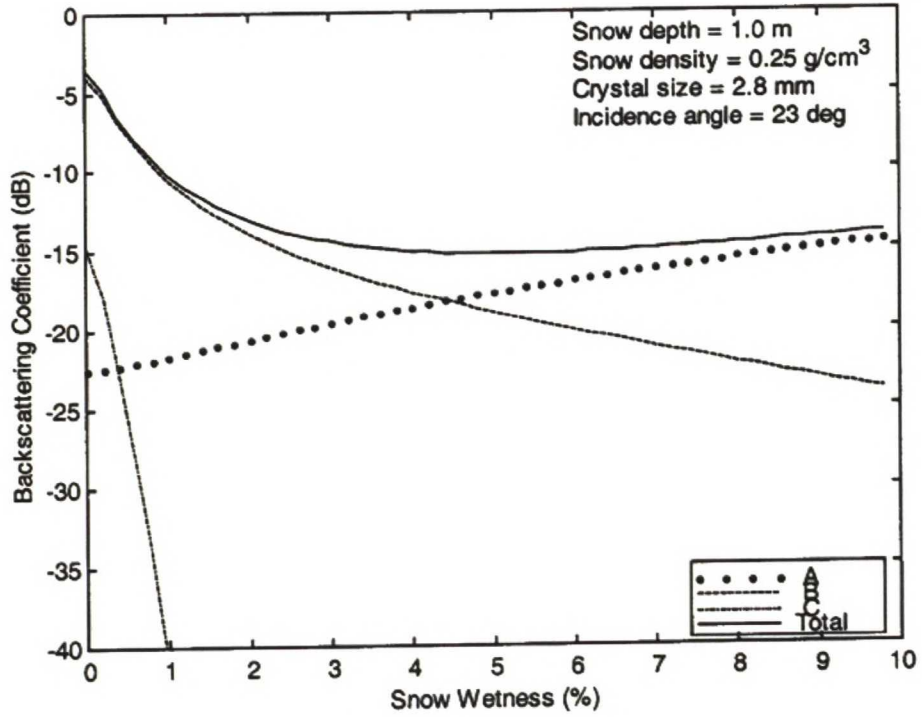
$$\sigma_B^0 = 0,5\omega T_{lt}T_{tl} \cos \Theta [1 - e^{-\frac{2\tau}{\cos \Theta_t}}] P_{pp}(\cos \Theta_t, -\cos \Theta_t; \pi) \quad (2.29)$$

jossa:

- ω = lumen tilavuussironnan albedo
- τ = optinen syvyys
- P_{pp} = tilavuussironnan vaihefunktio
- T_{lt} = Fresnelin tehonsiirtokerroin
- Θ_t = tehon tulokulma lumessa

Lumen tilavuussironnan albedo ω määritellään lumen sironta- ja ekstinktiokerrointen suhteena, eli:

$$\omega = \frac{\kappa_s}{\kappa_e}. \quad (2.30)$$



Kuva 2.4: Esimerkki eri sirontamekanismien kontribuutiosta kokonaissirontakertoimeen. (A) sironta ilman ja lumen rajapinnasta, (B) tilavuussironta lumipeitteestä ja (C) sironta lumen ja maan rajapinnasta. (Koskinen 2001)

Optinen syvyys τ määritellään puolestaan:

$$\tau = \kappa_e d. \quad (2.31)$$

Väliaineen sironta-, ekstinktio- sekä absorptiokerrointen sekä suhteellisen permittiivisyyden välinen yhteys on:

$$\kappa_a = \kappa_e - \kappa_s = 2k_0(|Im\sqrt{\epsilon_{ds}}|), \quad (2.32)$$

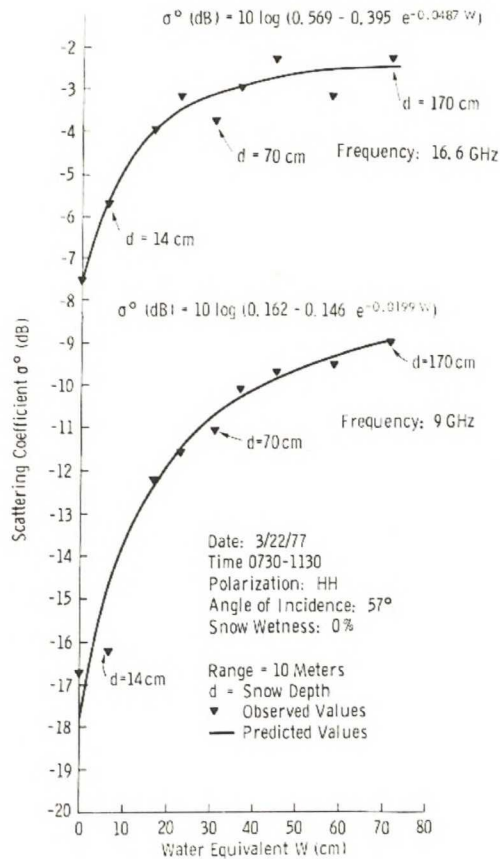
jossa k_0 on vapaan tilan aaltoluku.

Tarkastellaan tilannetta, jossa tarkastelusuunta Θ_t sekä lumen rakenne pysyvät vakioina ja ainoastaan lumipeitteen paksuus d muuttuu. Yhdistämällä lausekkeet 2.29, 2.30 ja 2.32 sekä yhdistelemällä termejä saadaan lauseke 2.29 muotoon:

$$\sigma_B^0 = A [1 - e^{-Bd}], \quad (2.33)$$

jossa A ja B ovat vakioita. Lausekkeen 2.33 mukaan lumipeitteen syvyyden kasvaessa myös σ_B^0 kasvaa, lähestyen lopulta tiettyä arvoa A . Lumen vesiarvon kasvaessa eli lumipeitteen paksuuden d lisääntyessä tilavuussironta kasvaa ja sirontakerroin siis kasvaa.

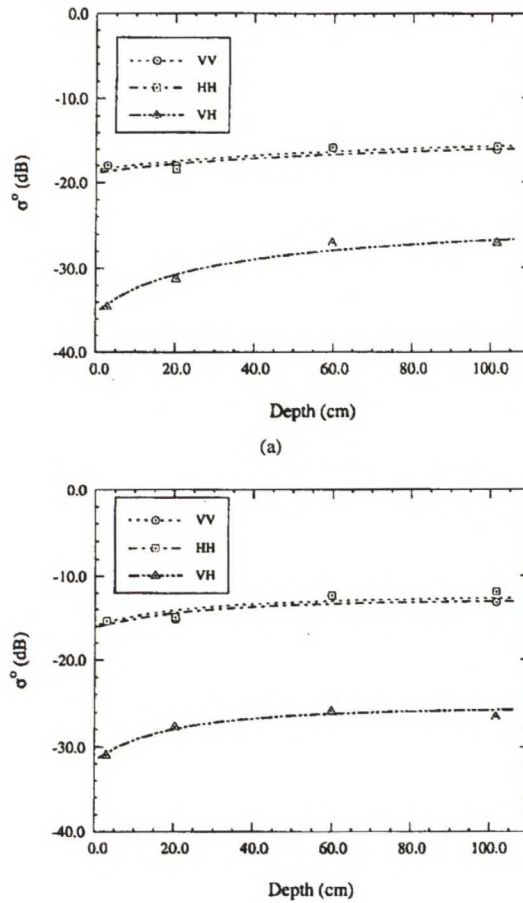
Kuivan lumen vesiaron vaikutus sirontakertoimeen eri taajuuksilla on esitetty kuvassa 2.5. Kuvasta huomataan, että lumen vesiaron kasvaessa sirontakertoimen on havaittu kasvavan kaavan 2.33 ennustamalla tavalla [8].



Kuva 2.5: Kuivan lumen vesiaron SWE vaikutus sirontakertoimeen eri taajuuksilla (Ula-by et al. 1982).

Lumipeitteen paksuuden vaikutus sirontakertoimeen on esitetty kuvassa 2.6. Kuvan perusteella mitattu sirontakerroin kasvaa lumipeitteen paksuuden kasvaessa. 100 cm paksu lumipeite on käytetystä taajuudesta ja polarisaatiosta riippuen noin 3-5 dB voimakkaampi sirottaja kuin paljas maa. [13]

Luonnollisen lumipeitteen tapauksessa lumen vesiaron tai syvyyden vaikutus tutkan mitamaan sirontakertoimeen ei kuitenkaan ole niin yksinkertainen kuin kuvat 2.5 ja 2.6 antavat ymmärtää. Joissain tilanteissa lumen ja maan rajapinnasta tapahtuva sironta voi olla voimakkaampaa kuin tilavuussironta lumen sisältä. Tällaisissa olosuhteissa kasvava lumipeite varjostaa lumen ja maan rajapinnan sirontaa. Tällöin σ_B^0 kasvaa yhtälön 2.33 mukaisesti, mutta samalla σ_C^0 pienenee. Varjostuksesta johtuva sirontakertoimen σ_C^0 pieneminen voi olla jopa voimakkaampaa kuin tilavuussirontan kasvamisesta aiheutuva σ_B^0 :

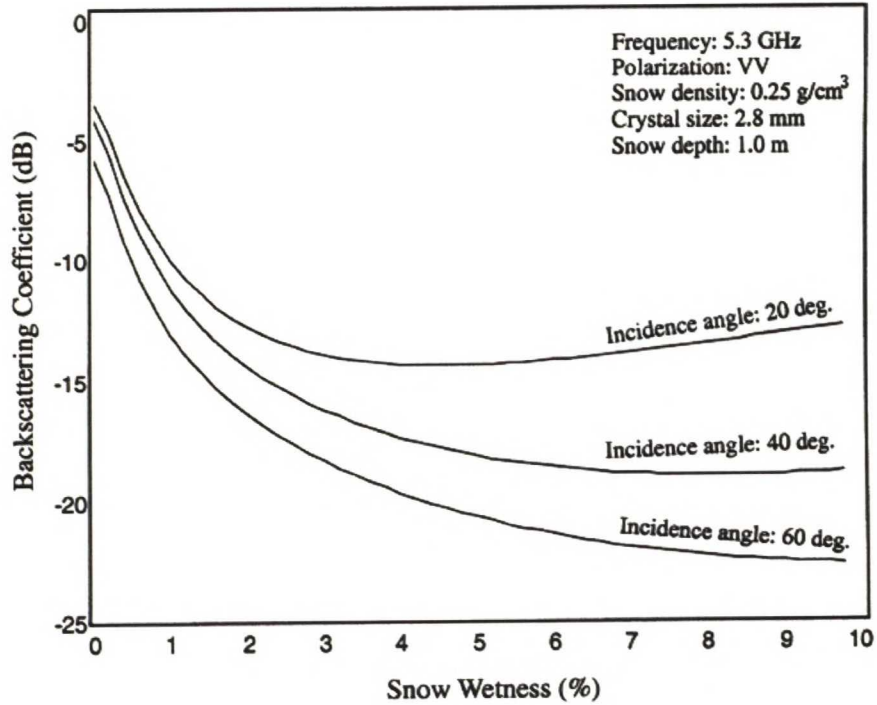


Kuva 2.6: Mitattu kuivan lumen peittämän maan sirontakerroin σ^0 eri polarisaatiolla taajuuksilla 5,3 GHz (ylempi) ja 9,5 GHz (alempi) lumen paksuuden d funktiona (Kendra et. al. 1998)

kasvu. Tällaisessa tapauksessa kokonaissirontakerroin σ^0 pienenee lumipeitteen paksuuden d ja lumen vesiarvon SWE kasvaessa. [14]

Sulamiskauden alkaessa lumen pinta muuttuu nopeasti kuivasta märäksi, jolloin tunkeutumissyvyys pienenee voimakkaasti. Tällöin tutkasignaali ei enää pääse tunkeutumaan lumipeitteen sisään ja mitattu sirontakerroin pienenee. Simuloitu sirontakertoimen pieneminen on esitetty kuvassa 2.7. Vertaamalla ERS-1 -satelliitin mittaamaa sirontakerrointa σ^0 vallitsevaan lumitilanteeseen Pohjois-Suomessa on havaittu sirontakertoimen pienenevän noin 3 dB lumipeitteen kostuessa. [16] Vastaavissa mittauksissa Kanadassa havaittiin RADARSAT -satelliitin mittaamassa sirontakertoimessa vain 1 dB ero märän ja kuivan lumen sirontakerrointen välillä [15]. Simulointien perusteella märän ja kuivan lumen sirontakerrointen eroon vaikuttaa erityisesti lumipeitteen pinnan epätasaisuus. [15]

Lumen edelleen sulaessa alkaa lumipeitteen alta paljastua yhä enemmän maan pintaa. Paljas maa on voimakkaampi sirottaja kuin märkä lumi, joten maan tullessa esiin siron-

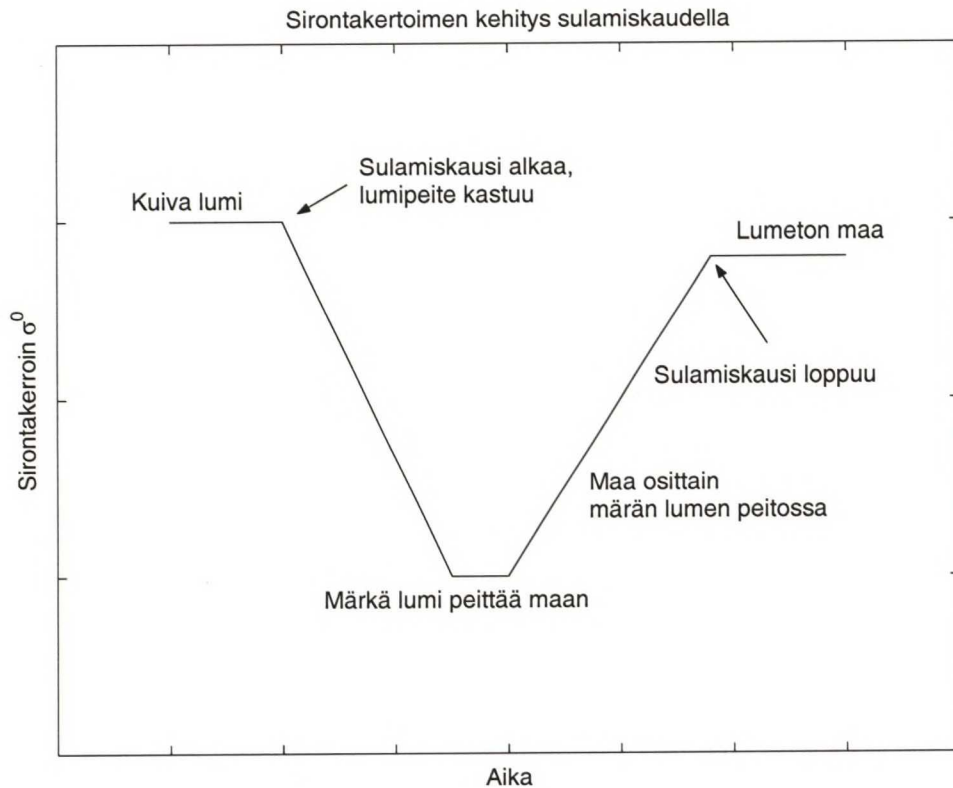


Kuva 2.7: Lumen kosteuden vaikutus sirontakertoimeen eri mittauskulmilla (Koskinen 2001).

takerroin alkaa kasvaa kohti paljaan maan sirontakerrointa. Vertaamalla sulamiskauden aikana mitattua sirontakerrointa märän lumen peittämän maan sekä paljaan maan sirontakertoimiin saadaan arvio lumen peittoalalle eli SCA:lle. Kuva 2.8 havainnollistaa sirontakertoimen kehittymistä sulamiskauden aikana. [16]

2.4 Mittausparametrien vaikutus sirontakertoimeen

Kuten edellisessä alaluvussa on todettu, tutkan mittausparametreilla on suuri vaikutus mitattuun sirontakertoimeen σ^0 . Lumen permittiivisyys ϵ_{sn} on taajuuden funktio [12]. Näin ollen myös mitattu sirontakerroin σ^0 on taajuuden funktio. Taajuuden kasvaessa sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus λ lähestyy sirottajien, lumen tapauksessa lumikiteiden, kokoluokkaa. Tämä havaitaan lumen vesiaron sekä lumikiteiden koon vaikutuksen voimistumisena. Eri taajuuksilla mitattuja lumen sirontakertoimia on esitetty kuvissa 2.5 ja 2.9. Kuvasta 2.5 voidaan huomata, että lumen vesiaron vaikutus mitattuun sirontakertoimeen on voimakkaampaa 9 GHz:n kuin 16,6 GHz:n taajuudella. Tästä voidaan päätellä 9 GHz:n taajuuden soveltuvan lumen vesiaron kaukokartoitukseen paremmin kuin 16,6 GHz:n taajuuden.

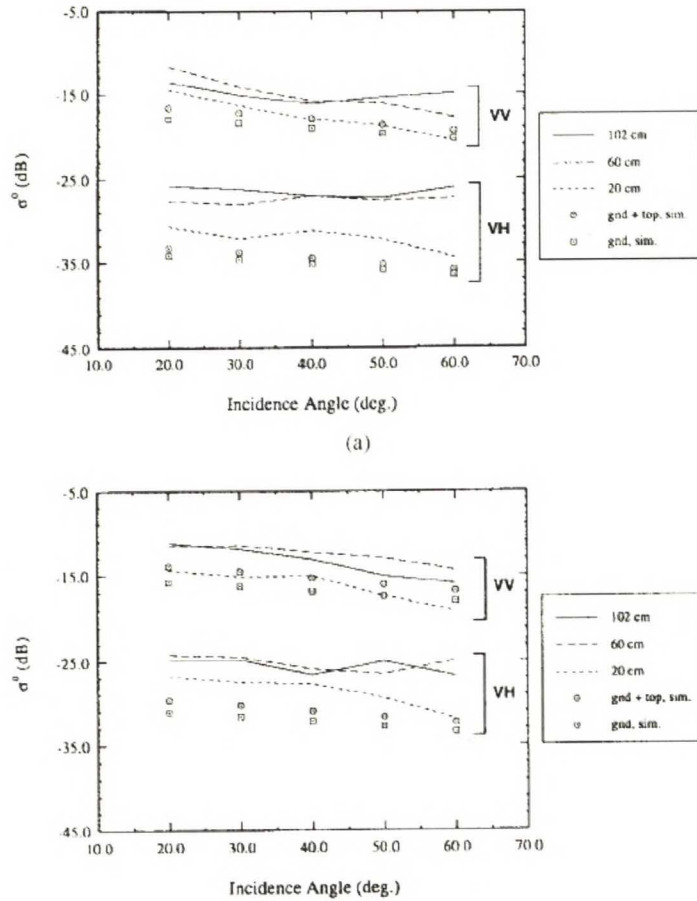


Kuva 2.8: Differentiaalisen sirontakertoimen periaatteellinen kehitys sulamiskauden aikana

Kuvasta 2.9 huomataan omituinen ilmiö: 60 cm:n lumipeitteestä mitattu sirontakerroin on 9,5 GHz:n taajuudella 60° mittauskulmalla suurempi kuin 102 cm:n lumipeitteestä mitattu sirontakerroin. Tämä on ristiriidassa kuvan 2.5 esittämien tulosten kanssa. Vastaavanlainen ilmiö on havaittavissa 5.3 GHz:n taajuudella 20° mittauskulmalla mitatuissa sirontakertoimissa. Mittauskulman muutoksen vaikutus on lisäksi erilainen eri taajuuksilla [13].

Kuvasta 2.6 voidaan tarkastella käytetyn polarisaation vaikutusta sirontakertoimeen. VV- ja HH-polarisaatioilla mitatut sirontakertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan. Eroa yhdensuuntaispolarisaatioiden välillä ei käytännössä ole. Sen sijaan VH-polarisaatiolla mitattu sirontakerroin on noin 10-15 dB yhdensuuntaispolarisaatioilla mitattua pienempi. Polarisaation vaikutus on samankaltainen sekä C- että X-alueella. [13]

Yleensä sirontakerroin σ^0 pienenee mittauskulman kasvaessa. Kuvan 2.7 mukaan mittauskulman vaikutus korostuu lumipeitteen kastuessa. Märälle lumelle ($m_v = 5\%$) σ^0 pienenee Koskisen käyttämän sirontamallin mukaan noin 5 dB mittauskulman kasvaessa kahdestakymmenestä neljäänkymmeneenviiteen asteeseen [16]. Vastaava mittauskulman vaikutus kuivalle lumelle on esitetty kuvassa 2.9. Kendran mittauksen mukaan mittauskulman vaikutus kuivan lumen sirontakertoimeen σ^0 riippuu lumipeitteen paksuudesta.



Kuva 2.9: Laskettu sekä mitattu lumen peittämän maan sirontakerroin σ^0 eri polarisaatiolla taajuuksilla 5,3 GHz (ylempi) ja 9,5 GHz (alempi) mittauskulman funktiona (Kendra et. al. 1998)

Yleensä σ^0 pienenee noin 3 dB mittauskulman kasvaessa kahdestakymmenestä neljäänkymmeneenviiteen asteeseen. Kuitenkin ohuella lumipeitteellä mittauskulman vaikutus on vaikeammin ennustettavissa — C-alueen VH-polarisaatiolla sirontakerroin jopa kasvaa muutamilla väleillä mittauskulman lisääntyessä.

Nykyiset satelliittitutkat mittaavat kohdetta usealla eri mittauskulmalla. Synteettisen aperatuurin tutkien eli SAR-tutkien mittauskulma muuttuu kuvan laidalta toiselle joissain tapauksissa yli 30 astetta. Esimerkiksi Envisatin ASAR-tutka mittaa mittauskulmilla 15°-45°. Mittauskulman vaikutus sirontakertoimeen on syytä ymmärtää, koska se pitää ottaa huomioon kuvia tulkittaessa.

Luku 3

HUTSCAT-sirontamittari

Helsinki University of Technology SCATterometer, lyhyemmin HUTSCAT, suunniteltiin ja rakennettiin Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratoriossa vuosina 1986-1991. Ensimmäiset mittaukset HUTSCATilla tehtiin vuonna 1988 [17]. Tämän jälkeen HUTSCATia on käytetty esimerkiksi metsän [18], merijään [19] ja lumen [20] kaukokartoitukseen liittyvissä mittauskampanjoissa.

3.1 Laitteen esittely

HUTSCAT on kahdeksankanavainen sirontaprofiileja tuottava FM-CW-sirontamittari, joka soveltuu sekä lento- että tornimittauksiin. HUTSCAT on suunniteltu asennettavaksi Bell 206 A/B Jet Ranger -helikopteriin. Sirontamittarin signaalinkäsittelyosa on mitoitettu sopimaan helikopterin takapenkille ja antenniteline asennettavaksi helikopterin taakakoukkuihin. Kuvassa 3.1 on HUTSCAT ja helikopteri kuvattuna Hailuodossa talvella 2003.

HUTSCAT käyttää taajuuksia 5,4 GHz (C-alue) sekä 9,8 GHz (X-alue). Nämä taajuudet on valittu vastaamaan satelliitti-instrumenttien käyttämiä taajuuksia. HUTSCATin data on suoraan vertailukelpoista Euroopan avaruusjärjestön ESan ERS-1 ja ERS-2 -satellittien sekä Envisat-satelliitin SAR-tutkien tuottaman datan kanssa. Myös Yhdysvaltain kansallisen avaruushallinnon NASAn Spaceborne Imaging Radar-C/X-band Synthetic Aperture Radar eli SIR-C/X-SAR sekä RADARSAT-1 -tutkat tuottavat HUTSCATin kanssa vertailukelpoista dataa.

HUTSCAT mittaa kummallakin käyttämällään taajuudella kaikki lineaaripolarisaatiokomponentit, eli sekä yhdensuuntaispolarisaatiot (HH ja VV) että ristipolarisaatiot (HV ja VH).

Mittauskulma valitaan sovelluksen mukaan. Esimerkiksi puuston korkeuden mittaukseen käytetään kulmaa 0° , eli antenni osoittaa suoraan nadiiriin. Avaruustutkat mittaavat kohdettaan miltei aina vinosti. Esimerkiksi Envisatin ASAR-tutkan mittauskulma vaihtelee

välillä 14° - 45° . Jos tarkoituksena on verrata HUTSCATin mittauksia satelliittitutkan mittauksiin, tehdään mittaukset kyseisen tutkan käyttämällä mittauskulmilla.

Sirontakertoimien mittauksen lisäksi HUTSCATin videolaitteisto tallentaa videokuvaa mitattavasta kohteesta. Videokamera on kiinnitetty helikopterin alle samaan telineeseen antennien kanssa. Mittauksen paikkatieto tallennetaan erillisellä GPS-laitteistolla.

HUTSCAT-laitteiston tekniset parametrit on esitetty taulukossa 3.1 [7] [21].



Kuva 3.1: HUTSCAT Hailuodossa talvella 2003

HUTSCATin mitaama suure on vastaanotettu teho P_R etäisyyden R funktiona kaikilla kahdeksalla kanavalla. Mitatusta tehosta voidaan laskea sirontakerroin σ^0 . Yhdistämällä peräkkäisiä mittauksia saadaan *sirontaprofiili* eli sirontakerroin ajan ja etäisyyden funktiona. Kun sirontaprofiili yhdistetään GPS-paikkatietoon, saadaan sirontakertoimista kohteen kaksikulotteinen läpileikkaus. Esimerkki HUTSCATin mitaamasta sirontaprofiilista on kuvana 3.1.

3.2 Mittauksen geometria

HUTSCATin antenniosa ripustetaan helikopterin alle taakkakoukkuihin. Tässä työssä esiteltäisiin mittauksiin käytettiin vuonna 1989 Avaruustekniikan laboratoriossa suunniteltua ja valmistettua antennien kiinnitystelinettä [22]. Vaikka teline aikoinaan suunniteltiin ja rakennettiin varsin tiukalla aikataululla, on se osoittautunut toimivaksi. Tällä telineellä HUTSCATin mittauskulmaa voidaan säätää portaattomasti välillä 0° - 45° nadiirista oikealle tai vasemmalle helikopterin lentosuuntaan nähden. Mittauskulma on säädettävä ha-

Taulukko 3.1: HUTSCAT-sirontamittarin tekniset parametrit

Parametri	Arvo
Keskitaajuus	5,4 ja 9,8 GHz
Polarisaatiot	HH, VV, HV ja VH
Modulaatio	FM-CW
Modulaatiokaistanleveys	300 MHz
Mittausetäisyys	20 - 167 m
Etäisyysresoluutio	0,68 m
Mittauskulma	0°-45° nadiirista
Antennin 3 dB keilan leveys	4, 7° (5,4 GHz) 4, 4° (9,8 GHz)
Antennin polarisaatioisolaatio	< 16,5 dB (5,4 GHz) < 16,5 dB (9,8 GHz)
Sirontakertoimen suhteellinen tarkkuus (90 % luottamusväli)	± 0,4 dB (5,4 GHz) ± 0,5 dB (9,8 GHz)
Sirontakertoimen absoluuttinen tarkkuus (90 % luottamusväli)	± 1,1 dB (5,4 GHz, VV-pol) ± 0,6 dB (5,4 GHz, HH-pol) ± 1,0 dB (5,4 GHz, HV-pol) ± 0,6 dB (5,4 GHz, VH-pol) ± 0,7 dB (9,8 GHz, VV-pol) ± 0,7 dB (9,8 GHz, HH-pol) ± 0,6 dB (9,8 GHz, HV-pol) ± 0,6 dB (9,8 GHz, VH-pol)

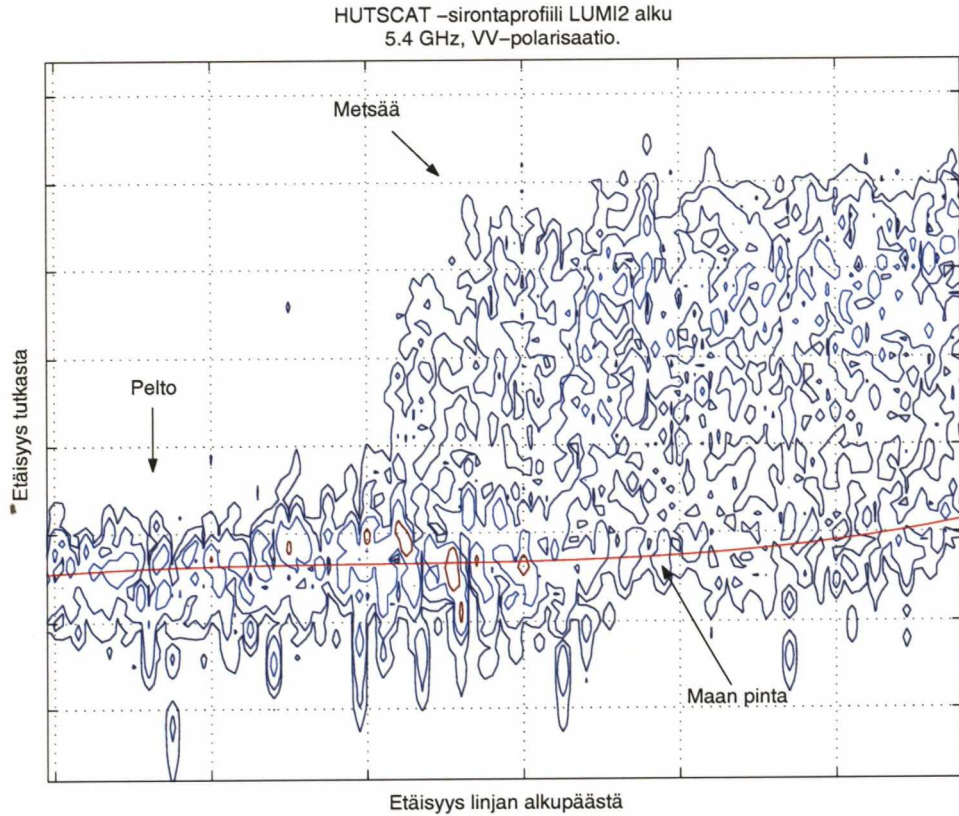
lutuksi ennen lento-onlähtöä. Antennien keilaan osuu yli 45° mittauskulmilla helikopterin jalas, mikä estää tätä suurempien mittauskulmien käyttöä.

HUTSCATin mittausetäisyys on 20-164 m. Pienimmän mahdollisen mittausetäisyyden rajoittaa 5,4 GHz:n antennin kaukokentän raja. Kopterin lentokorkeus on mittauskulmasta riippuen noin 100 m. Tyypillinen lentonopeus mittauksia tehtäessä on 50 solmua eli noin 80 km/h.

3.3 Tarkkuus

HUTSCATin mitattavan sirontakertoimen tarkkuutta on analysoitu erilaisille maastokoh-teille, muun muassa lumiselle mäntymetsälle. Tarkkuutta on arvioitu myös yleisemmin talvella lumisissa olosuhteissa [7].

HUTSCATin mitattavan sirontakertoimen absoluuttinen tarkkuus riippuu ulkoisen kali-broinnin tarkkuudesta eli mitattujen kalibroitimien tarkkuudesta. HUTSCATin ab-



Kuva 3.2: HUTSCATin mittaama sirontaprofiili. Mittauslinja LUMI1, 18.12.2003

soluuttinen tarkkuus on määritetty vertailemalla HUTSCATin mittaamia sirontakertoimia satelliittitutkien mittaamiin [24]. Tarkkuutta kuvataan ilmoittamalla mitatun sirontakerroimen 90 %:n luotettavuusrajat. HUTSCATin mittaaman sirontakertoimen absoluuttinen tarkkuus on kanavasta riippuen $0,8 \pm 0,3$ dB. Mittauksen suhteellisella tarkkuudella tarkoitetaan tarkkuutta, jolla samalla laitteella tehtyjä mittauksia voidaan vertailla keskenään. HUTSCATin suhteellisen tarkkuuden parantamiseksi HUTSCAT kalibroidaan sisäisesti viivelinjapiiriä käyttäen. HUTSCATilla mitattujen sirontakerrointen suhteellinen tarkkuus on 0,4-0,5 dB. HUTSCATin mittaamien sirontakerrointen absoluuttisen ja suhteellisen tarkkuuden 90 %:n luottamusrajat eri kanaville on esitetty taulukossa 3.1.

Luku 4

Aiemmat lumitutkimukset

Tässä luvussa esitellään aiempia lumipeitteen kaukokartoitukseen liittyviä tutkimuksia sekä niiden tuloksia. Aluksi käsitellään Teknillisen Korkeakoulun Avaruustekniikan laboratoriossa HUTSCAT-instrumentilla tehtyjä aiempia mittauksia. Lopuksi esitellään muutamia ulkomaisia satelliitti- ja lentokonetutkilla tehtyjä mittauksia.

4.1 Vuosien 1991-1993 HUTSCAT-kampanjat Sodankylässä

HUTSCAT-instrumentilla toteutettiin Sodankylän ympäristössä vuosina 1991-1993 laaja lumimittauskampanja osana Teknologian kehittämiskeskuksen (TEKES) rahoittamaa projektia "Application of ERS-1 Active Microwave Instrumentation Data to Remote Sensing of Snow". Mittausten perusteella mikroaaltotutkan havaittiin toimivan varsin hyvin yleisen lumitilanteen luokittamisessa. Vuosien 1991-1993 kampanja oli pääpiirteissään samanlainen kuin EnviSnow-projektin kampanja Tuusulassa vuosina 2002-2005, johon tämä työ pohjautuu. Merkittävin ero kampanjoiden välillä on, että Sodankylän kampanjan aikana erilaiset lumitilanteet erosivat toisistaan huomattavasti selvemmin kuin Tuusulan kampanjan aikana. Huomattavaa on myös, että Sodankylän koealueella metsän runkotilavuudet olivat selvästi pienempiä kuin Tuusulan koealueella.

Ville Jääskeläinen käytti lisensiaattityössään "Lumen kaukokartoitus mikroaaltotutkalla" Sodankylässä vuosina 1991 ja 1992 tehtyjä HUTSCAT-mittauksia. Jääskeläinen totesi mittauksien pohjalta mikroaaltotutkan soveltuvan yleisen lumitilanteen kaukokartoitukseen melko hyvin. Sodankylän kampanjan aikana ei kuitenkaan tutkittu tilanteita, joissa maassa on vain vähän lunta. Jääskeläinen totesi, että jo kahta kanavaa käyttäen kolmen eri lumitilanteen (lumeton maa – paljon kuivaa lunta – märkää lunta) välinen luokittelu onnistuu noin 75 % todennäköisyydellä, vaikka maastotyyppiä ei tunneta.

Jääskeläinen havaitsi HUTSCATin 9,8 GHz:n taajuuden paremmaksi lumen ominaisuuksien mittaamiseen kuin 5,4 GHz:n taajuuden. Lisäksi erilaisten lumitilanteiden luokittelu

sirontakerrointen perusteella onnistui melko hyvin, ja kun mitattavan kohteen maastotyyppi tiedettiin, lumitilanteiden luokittelu helpottui entisestään. Jääskeläinen totesi lumipeitteen vaikutuksen sirontakertoimeen olevan erilainen eri maastotyypeille ja ehdotti eri lumitilanteissa mitattujen sirontakerrointen käyttöä erilaisten maastotyyppien tunnistamiseen. [20].

Sodankylän kampanjan aikana kerättyä dataa on käytetty myös metsän sironnan tutkimiseen. Eri lumiolosuhteissa erilaisista metsätyypeistä mitattuja sirontakertoimia vertailemalla todettiin, että ristipolarisaatiota käyttämällä voidaan tutkimuksella erottaa metsä pellostä kaikissa lumiolosuhteissa. Lisäksi havaittiin, että kovalla pakkasella sironta maanpinnasta on voimakkaampaa kuin sironta puustosta. Lämpötilan noustessa yli nollan puustosta tulee voimakkaampi sirottaja kuin maasta. [23]

4.2 HUTSCAT ja ERS-1

HUTSCATin mittaamia sirontakertoimia on myös vertailtu satelliittitutkien mittaamiin sirontakertoimiin. Jarkko Koskinen vertasi HUTSCATilla eri tyyppisistä maastokohteista erilaisissa lumiolosuhteissa Sodankylän mittausalueilla vuosina 1991-1993 mitattuja sirontakertoimia ERS-1 -satelliittitutkan mittaamiin sirontakertoimiin. Koskinen käytti vertailussa 5,4 GHz:n VV-polarisaatiota.

Eri instrumenteilla mitattujen sirontakerrointen vertailu osoitti, että HUTSCATin mitaustulokset olivat hyvin samankaltaisia satelliittitutkan mitaustulosten kanssa. Lisäksi molempien instrumenttien mittaamat sirontakertoimet vaihtelivat samalla tavalla erilaisia maastotyyppejä mitatessa. Näin ollen HUTSCAT-mittausten tuloksia voidaan suoraan käyttää satelliitista mitattujen sirontakerrointen tulkitsemiseen.

Sekä HUTSCATin että ERS-1:n mittaamat sirontakertoimet pienenevät odotetusti lumipeitteen kostuessa. Lumipeitteen kostuessa mitattu sirontakerroin pieneni maastotyyppistä riippuen 2-4 dB. Metsäalueilla Koskinen jakoi sirontakertoimen puustosta ja maasta sironneisiin osiin. Tällöin hän havaitsi, että kovalla pakkasella, kun maassa on paksu, kuiva lumipeite, sironta maasta ja lumipeitteestä on huomattavasti voimakkaampaa kuin sironta jäätyneestä puustosta. Keväällä lumen ollessa märkää ja puuston sulaessa tiheässä metsässä puuston sirontakerroin muuttuu suuremmaksi kuin maan sirontakerroin. Tästä voidaan päätellä, että lumen ollessa kuivaa on mahdollista mitata lumipeitteen ominaisuuksia puustonkin läpi. Maaston, erityisesti lumen ja puuston, ollessa märkää, metsän runkotilavuus alkaa hallita mitatun sirontakertoimen suuruutta ja vastaavasti lumipeitteen ominaisuuksien vaikutus pienenee. [24]

4.3 Ulkomaiset lumitutkimukset

Vuonna 1991 Kaliforniassa Mt. Mammothin koealueella mitattiin Yhdysvaltain avaruushallinnon NASAn AIRSAR -instrumentilla lumen peittämän maan sirontakertoimia. AIR-

SAR on NASAn lentokonekäyttöinen SAR-tutka, joka käyttää suunnilleen samoja taajuuksia kuin tässä työssä käytetty HUTSCAT. Mittauskampanjan aikana maassa oli lunta noin 60 cm. Mitattujen sirontakerrointen perusteella todettiin C- tai X-alueen sirontakerrointen ja lumen vesiaron välisen korrelaation voivan olla negatiivinen tai positiivinen riippuen mittausparametreista, lumen ominaisuuksista sekä alla olevan maan ominaisuuksista. Tulosten perusteella todettiin myöskin lumen syvyyden määrittämiseen tarvittavan X-alueella oleva tai sitä korkeampi taajuus. [25]

Mt. Mammothin koealueella tehtiin vuoden 1994 lopulla mittauksia myös avaruussukulan mukana lentäneellä SIR-C/X-SAR -tutkalla. Näitä mittauksia on käytetty lumen sirontamallien kehittämiseen. Mittausten perusteella on tutkittu muun muassa lumen ja maan rajapinnan sironnan osuutta kokonaissirontakertoimesta. Tulosten mukaan maanpinnan sironnan osuus on merkittävä vielä paksullakin kuivalla lumipeitteellä. Shin mukaan maanpinnasta siroavan tehon osuus on HH-polarisaatiolla mittauskulmasta riippuen jopa 30-50 %. VV-polarisaatiolla vastaava osuus on 10-20 %. Tämä on huomattavasti suurempi kuin Koskisen tulos, joka on esitetty kuvassa 2.3. [14]

Vastaavia mittauksia on tehty myös Kanadassa. Magagi vertasi keväällä 1997 tehtyjä lumimittauksia RADARSAT-satelliitin SAR-kuviin. Magagi havaitsi C-alueella mitatun sirontakertoimen laskevan vain 1 dB, kun lumi muuttui kuivasta märäksi. Magagi totesi lumen pinnan epätasaisuuden olevan merkittävin sirontakertoimeen lumen kostuessa vaikuttava tekijä. Mitä tasaisempi lumipeite, sitä enemmän mitattu sirontakerroin tippuu lumipeitteen kostuessa. [15]

Luku 5

EnviSnow -mittauskampanja

Tässä luvussa esitellään Tuusulan koealueella lennetty mittauskampanja, jonka aikana kerättyyn dataan tämä diplomityö perustuu.

5.1 Tuusulan koealue

Tuusulan koealue sijaitsee Tuusulan kunnan alueella Tuusulanjärven länsipuolella. Alue osuu peruskarttalehden 2043 06 alueelle. Alueen keskipisteen koordinaatit ovat noin 60° 28' N ja 24° 59' E WGS84 tai 6705800 P 3389000 I KKJ. Alueella on kaksi mittauslinjaa, LUMI1 ja LUMI2, sekä 24 maastomittauspistettä, jotka sijaitsevat mittauslinjojen varsilla. Mittauslinjojen pituudet ja alku- sekä loppupisteet on esitetty taulukossa 5.1. Linjojen katsottiin alkavan eteläisemmästä pisteestä ja loppuvan pohjoisempaan pisteeseen. Maastomittauspisteiden koordinaatit on esitetty taulukossa 5.2, ja alueen kartta on kuvana 5.1.

Taulukko 5.1: Linjojen LUMI1 ja LUMI2 tiedot

Linja	Eteläpää (KKJ)	Pohjoispää (KKJ)	Linjan pituus
LUMI1	6705670 P 3390660 I	6710239 P 3387029 I	5840 m
LUMI2	6706540 P 3390880 I	6710919 P 3387380 I	5660 m

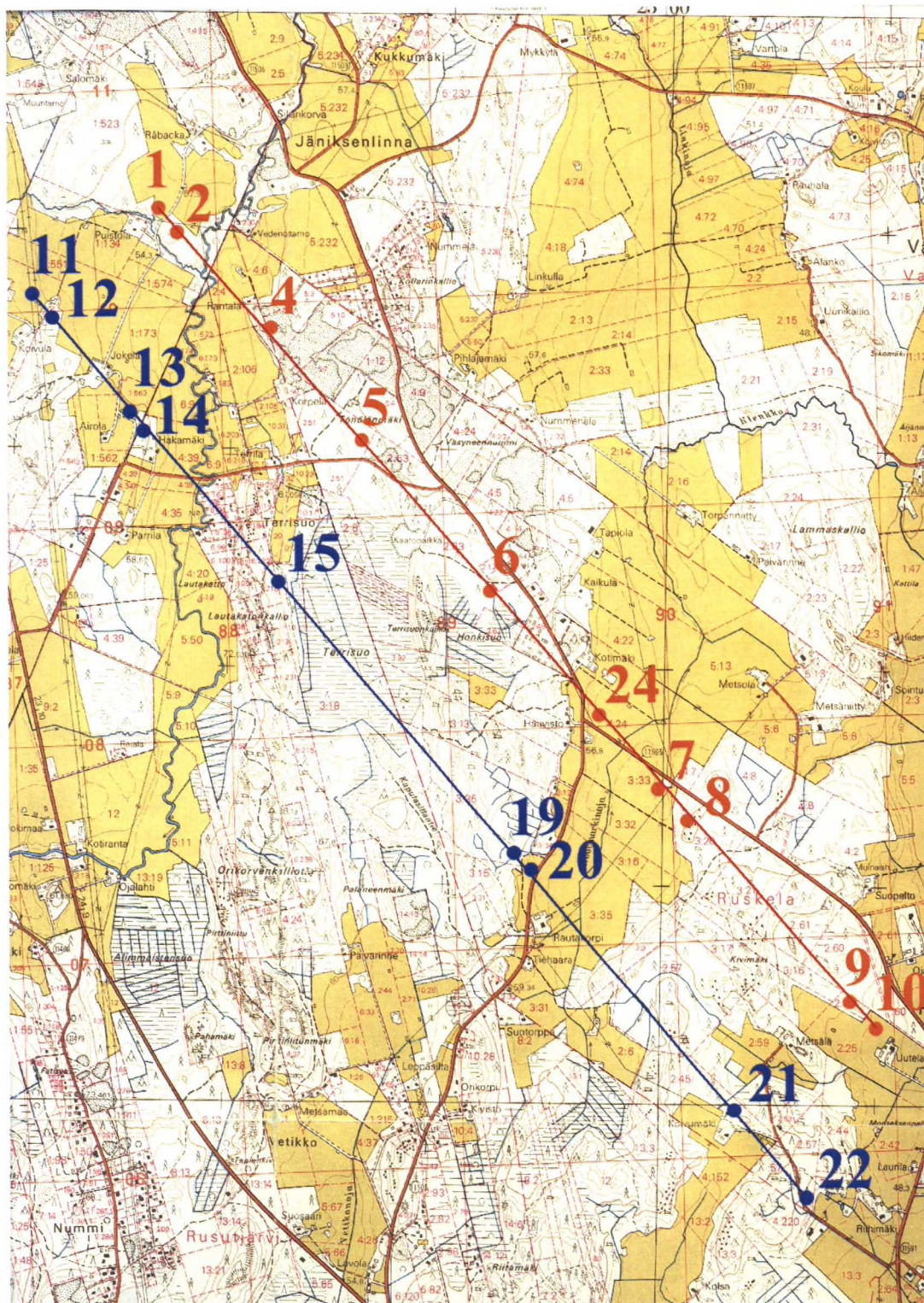
Koealueelle osuu havu-, seka- ja lehtimetsää, pelloja sekä soranottoalue. Tuusulan koealue edustaa hyvin eteläsuomalaista maastoa. Suurin osa alueesta on tyypillistä havumetsää. Metsän runkotilavuus vaihtelee välillä $0 \frac{m^3}{ha}$ - $500 \frac{m^3}{ha}$. Alueella on myös joitain rakennuksia. Molemmilla linjoilla on asuinrakennuksia, linjan LUMI1 loppupäässä maatalousrakennuksia sekä linjan LUMI2 keskivaiheilla teollisuusrakennuksia.

Tuusulan koealue sijaitsee lähellä Helsinkiä, joten maastomittausryhmä ja helikopteri saadaan paikalle lyhyelläkin varoitusaajalla. Läheiseltä Helsinki-Vantaan lentokentältä (EFHK)

Taulukko 5.2: Tuusulan mittausalueen maastomittauspisteet

Pisteen numero	Koordinaatit (KKJ)	Maastotyyppi	Linja
1	6710600 P 3387600 I	Pelto	LUMI2
2	6710500 P 3387600 I	Pelto	LUMI2
4	6710100 P 3388100 I	Sorakuoppa	LUMI2
5	6709600 P 3388300 I	Puoliavoin metsä	LUMI2
6	6708800 P 3389100 I	Metsä	LUMI2
7	6707900 P 3389900 I	Pelto	LUMI2
8	6707800 P 3390000 I	Puoliavoin metsä	LUMI2
9	6706900 P 3390800 I	Metsä	LUMI2
10	6706800 P 3390700 I	Pelto	LUMI2
11	6700600 P 3386600 I	Pelto	LUMI1
12	6709900 P 3387000 I	Lepikko	LUMI1
13	6709500 P 3387600 I	Pelto	LUMI1
14	6709400 P 3387700 I	Kuusikko	LUMI1
15	6708800 P 3388200 I	Harva koivikko	LUMI1
19	6709300 P 3389300 I	Tiheikkö, koivua	LUMI1
20	6707300 P 3389300 I	Pelto	LUMI1
21	6706200 P 3390200 I	Kuusikko	LUMI1
22	6705700 P 3390600 I	Metsä	LUMI1
24	6708200 P 3389500 I	Pelto	LUMI2

operaiva lentokone tai helikopteri lentää alueelle vain muutamia minuutteja. Toisaalta lentokentän läheisyys voi etenkin ruuhka-aikoina aiheuttaa ongelmia tarvittavien ilmatilaselvitysten saamisessa lennonjohdolta. Helsinki-Vantaan lähialueen pohjoisin VFR-ilmoittautumispiste Kolis on aivan linjan LUMI1 eteläpäässä. Matalalla lentävälle helikopterille ei ilmatilaselvitysten saaminen mittauskampanjan aikana osoittautunut vaikeaksi, kunhan lento suunniteltiin huolellisesti.



Kuva 5.1: Tuusulan koalueen kartta, mittaussinjat LUMI1 (sininen) ja LUMI2 (punainen) sekä maastomittauspisteet (karttapohja: Maanmittauslaitos)

5.2 Mittauslennot

EnviSnow-mittauskampanjassa lennettiin vuosien 2002-2005 aikana yhteensä 13 HUTSCAT-mittauslentoa. Lentojen tiedot on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3: EnviSnow -mittauslennot Tuusulassa vuosina 2002-2005

Päivämäärä	Lumipeitteen paksuus (cm)	Lumipeitteen kosteus	Huomattavaa
20.3.2002	0-100	Märkä lumi	Ongelmia FFT-korteissa
25.3.2002	0-100	Märkä lumi	Ongelmia FFT-korteissa
26.3.2002	0-100	Märkä lumi	Ongelmia FFT-korteissa
2.9.2002	0	Lumeton maa	
18.12.2002	10-20	Kostea lumi	
6.2.2003	20-50	Kostea lumi	
28.2.2003	20-50	Kostea lumi	
22.5.2003	0	Lumeton maa	
24.10.2003	0	Lumeton, routainen maa	Myös 37°, 20 dB vaimennus
11.2.2004	20-50	Kuiva lumi	
7.4.2004	0-40	Märkä lumi	
18.3.2005	30-45	Kuiva lumi	20 dB vaimennus
3.5.2005	0	Lumeton maa	

Kaikki mittauslennot suoritettiin Helikopterikeskus Oy:n helikopterilla. HUTSCAT-laitteisto asennettiin helikopteriin Helikopterikeskuksen tiloissa Hernesaaren helikopterilentopaikalla (EFHE) Etelä-Helsingissä. Siirtolento mittausalueelle tehtiin joko suoraan Helsingin kaupungin ja Helsinki-Vantaan lentokentän yli tai muun liikenteen niin vaatiessa Helsinki-Vantaan lähialue kiertäen. Lähialueen kiertäminen lisäsi lentoaikaa noin kahdeksakymmenellä minuutilla. Tyypillinen ongelmitta sujunut mittauslento kesti alueella noin tunnin, siirtolentoineen lyhimmillään noin puolitoista tuntia.

Mittauslinjat lennettiin kahteen eri suuntaan. Aluksi linjat lennettiin etelästä pohjoiseen ja välittömästi sen jälkeen pohjoisesta etelään. Sirontakertoimia laskettaessa eri suuntiin tehdyt mittaukset yhdistettiin. Mittauskulman vaihtamiseksi etsittiin mittausalueen kaakkoispuolelta helikopterille laskeutumispaikka. Laskeutumispaikaksi valittiin syrjäinen ja riittävän tasainen pelto tai hakkuuaukea.

Mittauslennoilla mitattiin HUTSCATilla molemmat mittauslinjat LUMI1 ja LUMI2 mittauskulmilla 23° ja 45°. Poikkeuksen muodostavat lennot 20.3.2002, 25.3.2002 ja 26.3.2002, jolloin laitteisto-ongelmat HUTSCATin signaalinkäsittelyosassa, tarkemmin FFT-muunnoksen laskemiseen käytetyssä elektroniikassa, pakottivat keskeyttämään lennon, sekä lento 24.10.2003, jolloin molemmat linjat mitattiin myös kallistuskulmalla 34° mutta kallistuskulmalla 23° mitattiin vain LUMI1 ja 45° mittauskulmalla vain LUMI2.

Kaikista mittauslennoista tallennettiin mittaustulosten tulkinnan helpottamiseksi videokuvaa koko lennon ajan.

Yleisimmät ongelmat lennoilla olivat HUTSCATin signaalinkäsittelykorttien toimintahäiriöt ja ongelmat GPS-laitteistossa. HUTSCATin signaalinkäsittelykorttien muistipiirit vaihdettiin uusiin syksyllä 2003, mikä vähensi laitteiston toimintahäiriöitä merkittävästi. GPS-laitteiston viat aiheuttivat ajan menetystä joillain lennoilla. Vuoden 2004 lennoilla käytettiin varajärjestelmänä helikopterin omaa GPS-vastaanotinta, joka osoittautui huomattavasti aiemmin käytettyä kannettavaa GPS-vastaanotinta varmatoimisemmaksi. Tämän takia vuoden 2005 kahdella lennolla käytettiinkin ainoastaan helikopterin omaa GPS-vastaanotinta.

Mittauslennolla 18.3.2005 ja 24.10.2003 HUTSCATin 20 dB vaimennuspiiri jäi erehdyksessä päälle. 20 dB vaimennuspiiri voidaan ottaa huomioon sirontakertoimia laskettaessa. Kuitenkin mitatessa yli 100 m etäisyyksillä ja yli 20° mittauskulmilla jää vastaanotettu teho vastaanottimen tehoalueen alapäähän. Tämä aiheuttaa mittauksen herkkyyden huononemisen. Tämän takia tässä työssä ei käytetä 20 dB vaimennuspiirin päällä ollessa tehtyjä mittauksia. Onnistuneet mittaukset on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4: EnviSnow kampanjan onnistuneet mittaukset

Päivä	LUMI1 23°	LUMI2 23°	LUMI1 45°	LUMI2 45°
20.3.2002		X		
25.3.2002	X			X
26.3.2002				
2.9.2002	X	X	X	X
18.12.2002	X	X	X	X
6.2.2003	X	X	X	X
28.2.2003	X	X	X	X
22.5.2003	X	X	X	X
24.10.2003				
11.2.2004	X	X	X	X
7.4.2004	X	X	X	X
18.3.2005				
3.5.2005	X	X	X	X

5.3 Maastomittaukset

Samaan aikaan lentomittausten kanssa TKK:n Avaruustekniikan laboratorion maastoryhmät mittasivat maastosta lumen ja maan ominaisuuksia. Maastomittausryhmät mittasivat lumipeitteen paksuuden, tiheyden, kosteuden, vesiarvon sekä lämpötilan eri syvyyksillä. Lumen kosteuden ja tiheyden mittaamiseen käytettiin insinööritoimisto Toikan lumi-

haarukkaa. Lumihaarukka mittaa myös lumen dielektrisyysvakion ϵ_{sn} noin 870 MHz:in taajuudella. Maan lämpötila mitattiin maan pinnasta sekä mahdollisuuksien mukaan eri syvyyksiltä noin 20 cm syvyyteen asti. Lämpötilojen mittaamiseen käytettiin digitaalista lämpömittaria. Lisäksi mahdollisuuksien mukaan mitattiin maan kosteus näytemenetelmällä. Lumen vesiarvo SWE mitattiin Suomen ympäristökeskuksen lumipuntarilla. Kuva 5.2 esittää lumen vesiarvon mittausta. Maastosta otettiin myös mahdollisimman paljon valokuvia.



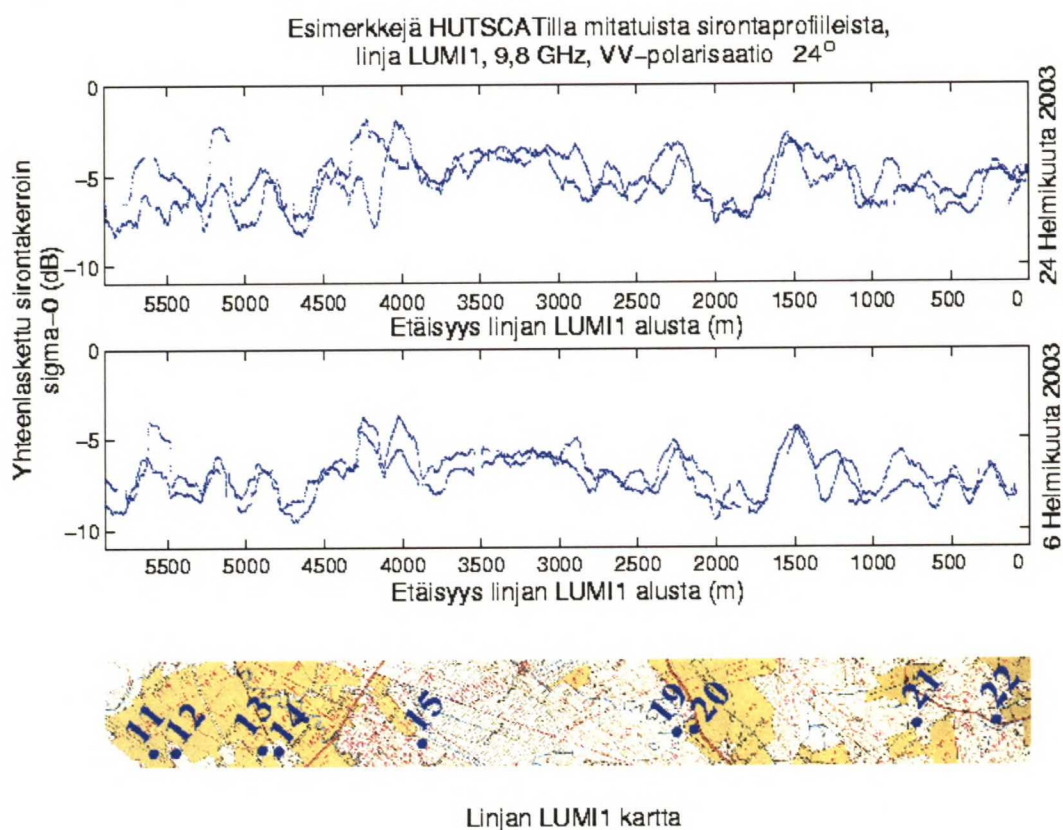
Kuva 5.2: Lumen vesiarvon mittausta Tuusulassa helmikuussa 2003

5.4 Sirontakertoimien laskeminen

HUTSCATin mittaamista tehon P_R arvoista laskettiin sirontakerroin $\sigma^0(R_x, R_y)$ kaikilla kahdeksalla kanavalla. R_x on pitkin mittaussinjaa mitattu etäisyys linjan alkupäästä ja R_y on etäisyys tutkasta. Myös GPS-laitteiston mitaama paikkatieto sekä maastomittausten tulokset muutettiin Matlab-muotoon eri suureiden vertailun mahdollistamiseksi. Sirontakertoimet yhdistettiin paikkatietoon vertaamalla HUTSCATin ja GPS-laitteiston tallentamia aikavektoreita. FFT-muunnoksessa tai datan tallennuksessa tapahtuneet bittivirheet havaittiin suurina sironneen tehon arvoina etäisyyksillä 10-30 m tutkan antennista. Heli-

kopterimittauksia tehtäessä tällä etäisyydellä tutkasta on vain ilmaa, joten sironnan pitäisi olla hyvin pientä. Bittivirheiksi tulkitut mittaukset hylättiin.

Eri etäisyyksiltä R_y mitatut absoluuttiset sirontakertoimet laskettiin yhteen kokonaissirontakertoimeksi $\sigma^0(R_x)$. Tästä sirontakertoimesta laskettiin häilynnän poistamiseksi liukuva keskiarvo aina 100 peräkkäistä mittausta keskiarvoistaen. Liukuva keskiarvo piirrettiin etäisyyden R_x funktiona, jolloin saatiin kuvan 5.3 kaltainen kuvaaja. Tällä tavoin saatuja profileja käytettiin HUTSCATin sekä GPS-laitteiston kellojen keskinäisestä virheestä johtuvan paikkatiedon virheen havaitsemiseen ja korjaamiseen. Eri profiilien muotoja verrattiin toisiinsa, ja tarvittaessa HUTSCATin tallentamaan aikavektoriin lisättiin tai siitä poistettiin sekunteja kunnes muodot osuivat kohdakkain.



Kuva 5.3: Tyypillinen mittauskamppajan aikana mitattu profiili Tuusulan koealueen linjalta LUMI1

Kuvassa 5.3 on tyypillinen profiili, jossa on nähtävissä lentosuunnan sekä mittauslinjaa kohtisuoraan olevan suunnan paikkavirheen vaikutus sirontakertoimeen. Eri suuntiin mitatuissa sirontakertoimissa on havaittavissa selvä ero etäisyyksillä 500-1000 m linjan alusta. Tämä johtuu siitä, että antennin keila on osunut toiseen suuntaan lennettäessä etelässä olevaan peltoon ja toiseen suuntaan lennettäessä pohjoisessa olevaan peltoon.

Kuvassa 5.1 olevasta koealueen kartasta voidaan huomata, että melko pieni virhe helikopterin paikassa voi aiheuttaa keilan osumisen aivan erilaiseen maastotyyppiin tai jopa mittauslinjan lähellä oleviin rakennuksiin. Erityisen suuri ongelma tämä on molempien linjojen alku- ja loppupäissä. Tarkempaa tarkastelua varten valittiin alueita linjojen keskiosista, missä maasto pysyy samankaltaisena myöskin siirryttäessä pois linjalta. Tällaista aluetta on LUMI1:llä mittauspisteiden 15 ja 19 sekä 20 ja 21 välissä. Linjalla LUMI2 vastaavat välit ovat pisteiden 5 ja 6 sekä 24 ja 7 välissä.

Sirontakertoimien vertailun helpottamiseksi data jaettiin pikseleihin. Pikselin sirontakertoimen arvoksi keskiarvoistettiin 20 peräkkäistä mittausa. Tällöin häilynnän ja vaikutus pieneni ja pikseliksi saatiin noin 20 m pitkä pala mittauslinjaa. Tähän kokoon päädyttiin, koska useiden satelliittitutkien pikselin halkaisija on noin 20 m. Sirontakertoimien ja erilaisten suureiden yhteyksien havainnollistamiseksi laskettiin yleensä tietylle tarkasteluvälille osuneiden pikselien sirontakertoimien keskiarvo sekä näiden keskihajonta. Joissain tapauksissa käytettiin tarkasteluvälinä koko mittauslinjaa.

5.5 Lumiolosuhteet

Mittauskamppajan aikana tehtiin mittauslentoja vaihtelevissa lumiolosuhteissa. Paksuin lumipeite maassa oli helmikuussa tehdyissä mittauksissa, jolloin lunta oli maassa enimmillään 40-50 cm. Lumen sulamiskaudella tehdyissä mittauksissa maaliskuussa 2002 ja huhtikuussa 2004 lumi oli jo kokonaan sulanut osista peltoaukeita. Lumettoman maan mittauksissa maassa ei luonnollisesti ollut lunta. Kuten luvussa 2 on todettu, nestemäisen veden osuus m_v on tutkamittauksen kannalta hyvin merkittävä suure. Sirontakerroin muodostuu eri tavoilla riippuen lumen kosteudesta. Tämän takia tehdyt mittauslennot on jaoteltu lumen kosteuden mukaan märän, kostean ja kuivan lumen sekä lumettoman maan lentoihin.

5.5.1 Märkä lumi

Märäksi lumeksi määriteltiin lumi, jonka pinnalla lumen tilavuudesta yli 1,5% oli nestemästä vettä eli $m_v \geq 1,5\%$. Tällöin käytettyjen taajuuksien (5,4 GHz ja 9,8 GHz) tunkeutumissyvyys lumeen on suurusluokaltaan kymmenen senttiä tai vähemmän, eikä signaali pääse tunkeutumaan lumipeitteen yläosia syvemmälle. Sulava lumi on poikkeuksetta märkää. EnviSnow-mittauskampanjan aikana tällaiset olosuhteet vallitsivat maaliskuussa 2002 sekä huhtikuussa 2004 tehdyillä lennoilla. Kaikilla märän lumen lennoilla oli osissa peltoja jo pälvä. Kuva 5.4. havainnollistaa 20.3.2002 vallinneita olosuhteita.

5.5.2 Kuiva lumi

Lunta kutsutaan kuivaksi lumeksi, jos siinä ei ole ollenkaan nestemäistä vettä, eli $m_v = 0\%$. EnviSnow-mittauskampanjan aikana mitattiin kuivaa lunta lennoilla helmikuussa 2004 ja maaliskuussa 2005.

5.5.3 Kosteaa lumi

Kosteaksi lumeksi kutsutaan tässä työssä lunta, joka ei ole kuivaa eikä märkää eli $0\% < m_v < 1,5\%$. Kosteaa lumi on Etelä-Suomessa yleisempää kuin kuiva lumi, koska lämpötila käy talvisin usein nollan yläpuolella. EnviSnow-mittauskampanjan aikana lumi oli kosteaa joulukuussa 2002 ja helmikuussa 2003.



Kuva 5.4: Osa linjaa LUMI1 helikopterista kuvattuna 20.3.2002

5.5.4 Lumeton maa

Lumetonta maata mitattiin EnviSnow-kampanjan aikana neljällä lennolla. 3.5.2005 lumi oli juuri sulanut metsästä ja maa oli vielä märkä. 22.5.2003 lumen sulamisesta oli jo kulunut noin kuukausi, maa oli jo kuivunut ja kevät oli pitkällä. 24.10.2003 maa oli osittain jäässä syksyn ensimmäisten pakkasöiden jäljiltä. 2.9.2002 mittauksen aikana vallitsivat tyypilliset alkusyksyn olosuhteet: maa oli melko kuiva.

Luku 6

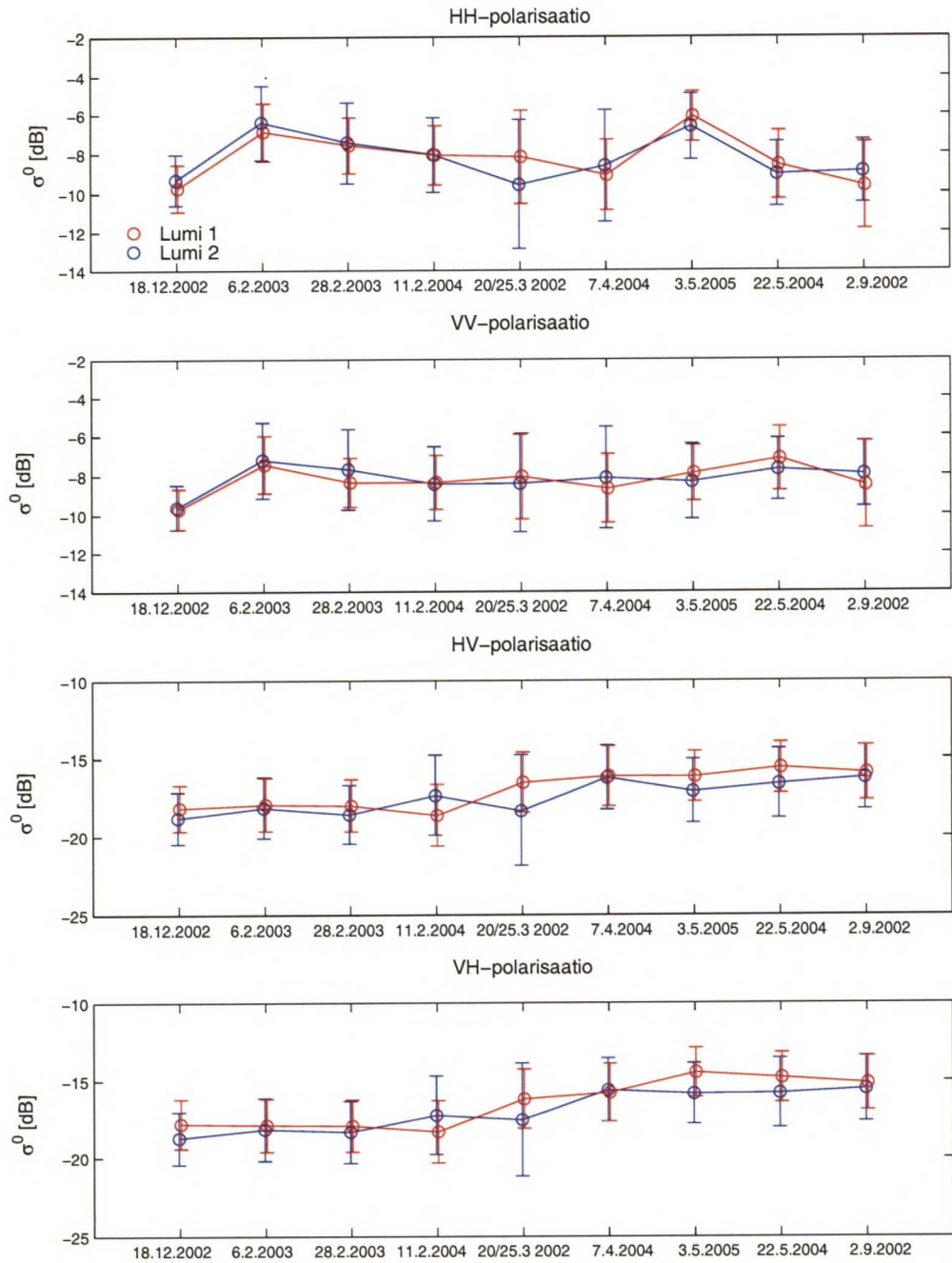
Lumipeitteen ja maanpinnan vaikutus sirontaan

Tässä luvussa käsitellään mitatun sirontakertoimen σ^0 riippuvuutta lumipeitteen ja maanpinnan ominaisuuksista. Esitetyt sirontakertoimen arvot on saatu keskiarvoistamalla 20 peräkkäistä mittausta yhdeksi pikseliksi. Esitetty arvo on tietylle tarkasteluvälille osuneiden pikselien arvojen keskiarvo sekä keskihajonta. Käytettyjen tarkasteluvälien pituudet on mainittu taulukoissa 6.1 ja 6.2. Kokonainen mittauslinja vastaa vähintään 250 pikseliä ja tarkasteluvälit 5-20 pikseliä. Eri suuntaan lennettäessä tehdyt mittaukset on yhdistetty.

Kuvissa 6.1-6.4 on esitetty koko mittauskampanjan aikana mitattujen sirontakertoimien σ^0 keskiarvo sekä keskihajonta. Tarkasteluvälinä on käytetty koko linjaa. Maaliskuussa 2003 ei mitattu linjaa LUMI1 45° mittauskulmalla, joten tämä arvo puuttuu kuvaajista kuvissa 6.2 ja 6.4. Kuvia 6.1-6.4 tulkitessa pitää huomata, että mittaukset on tehty neljän eri vuoden aikana.

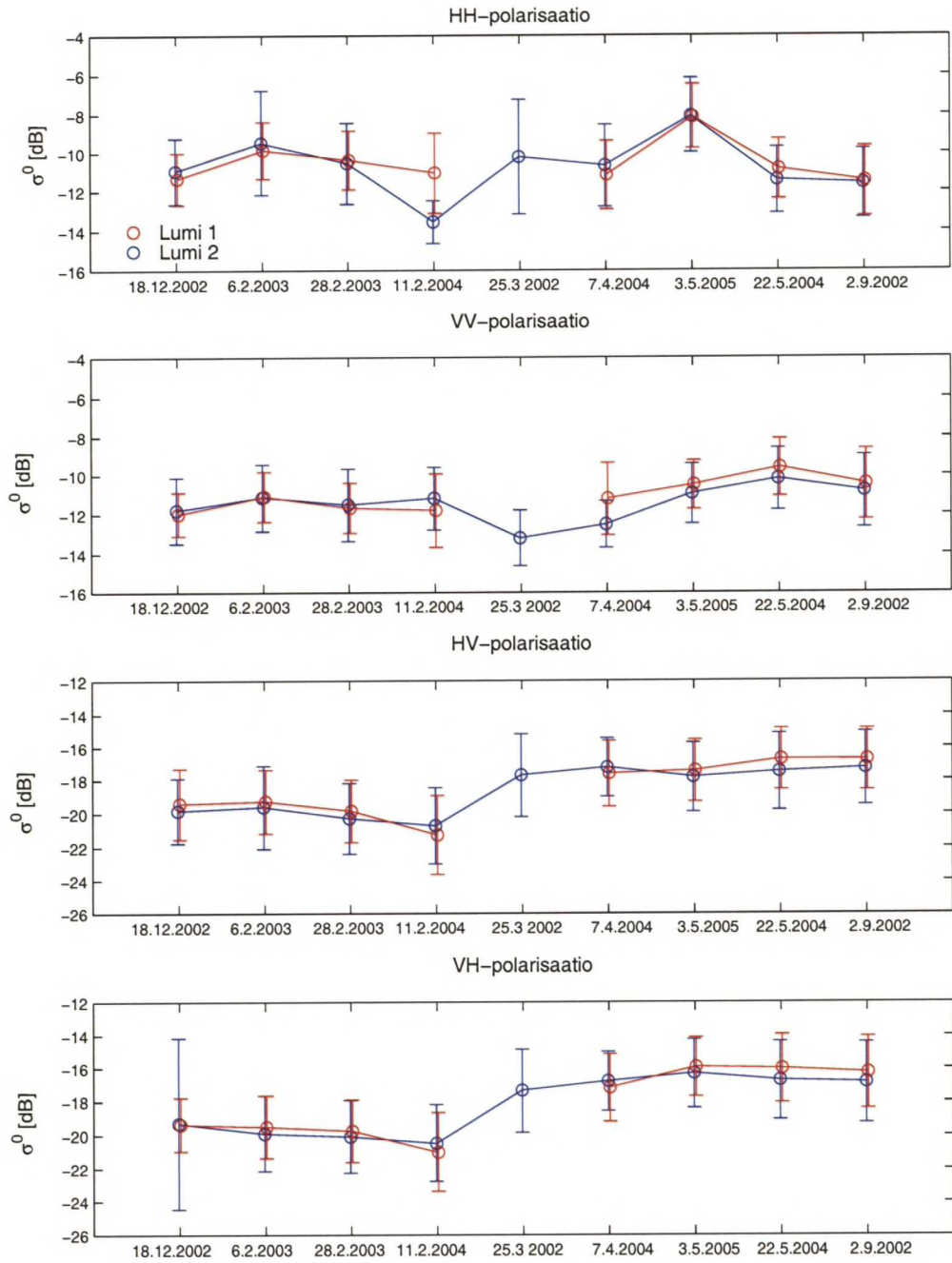
5,4 GHz taajuudella ristipolarisaatioilla mitattu sirontakerroin on kesäisin suurempi kuin talvisin, mikä näkyy selvästi kuvista 6.1 ja 6.2. Todennäköinen selitys sirontakertoimen kasvulle on kasvillisuus. Kesällä maan päällä oleva kasvillisuus sirottaa voimakkaammin kuin talvella. Sekä biomassaa että nestemäistä vettä on enemmän kesällä kuin talvella. Vastaavaa sirontakertoimen kasvua ei kuitenkaan ole havaittavissa 9,8 GHz:n taajuudella tehdyissä mittauksissa (kuvat 6.3 ja 6.4).

Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattu σ^0 ja keskihajonta – mittauskulma 23° , taajuus 5,4 GHz



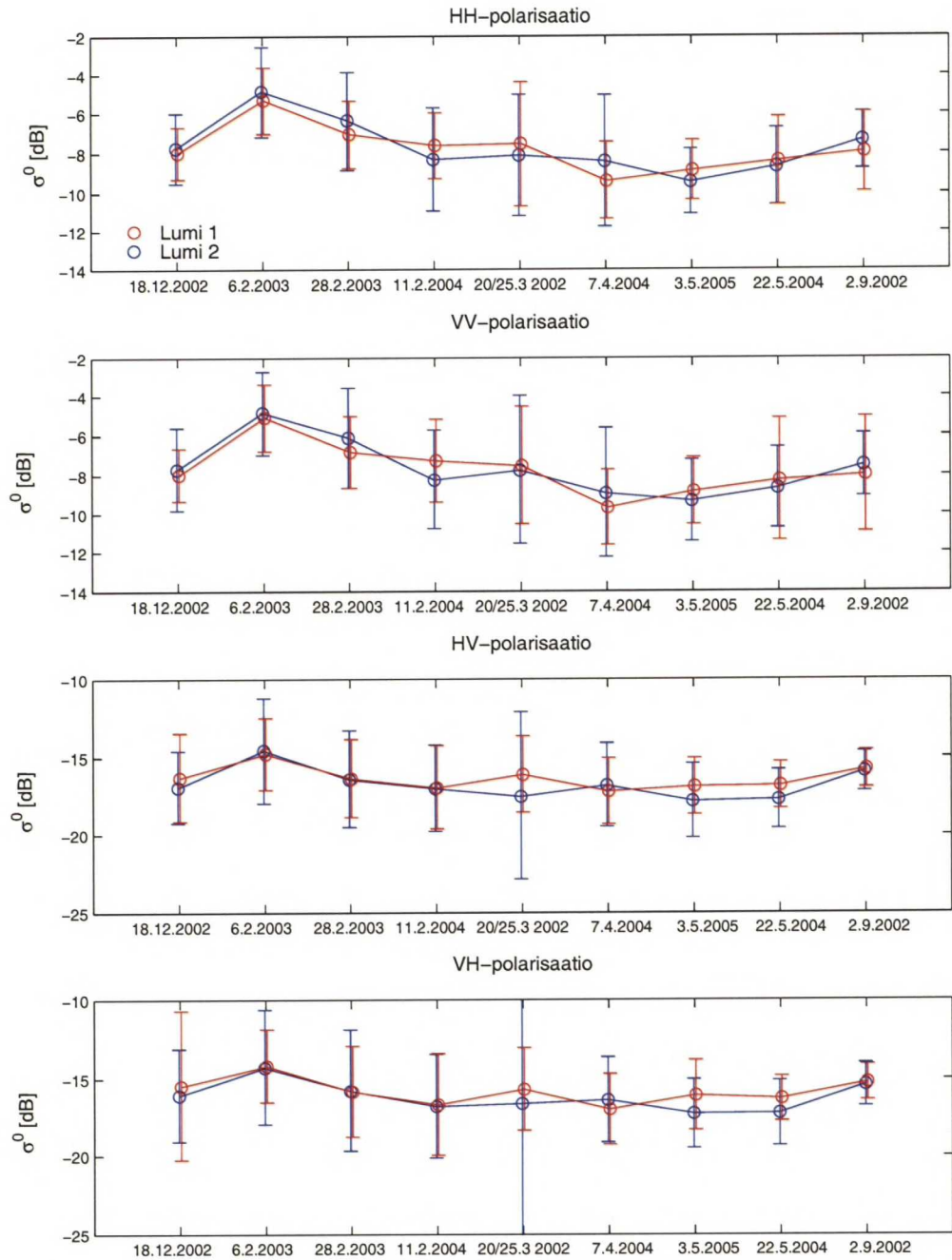
Kuva 6.1: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 23° taajuus 5,4 GHz

Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattu σ^0 ja keskihajonta – mittauskulma 45° , taajuus 5,4 GHz



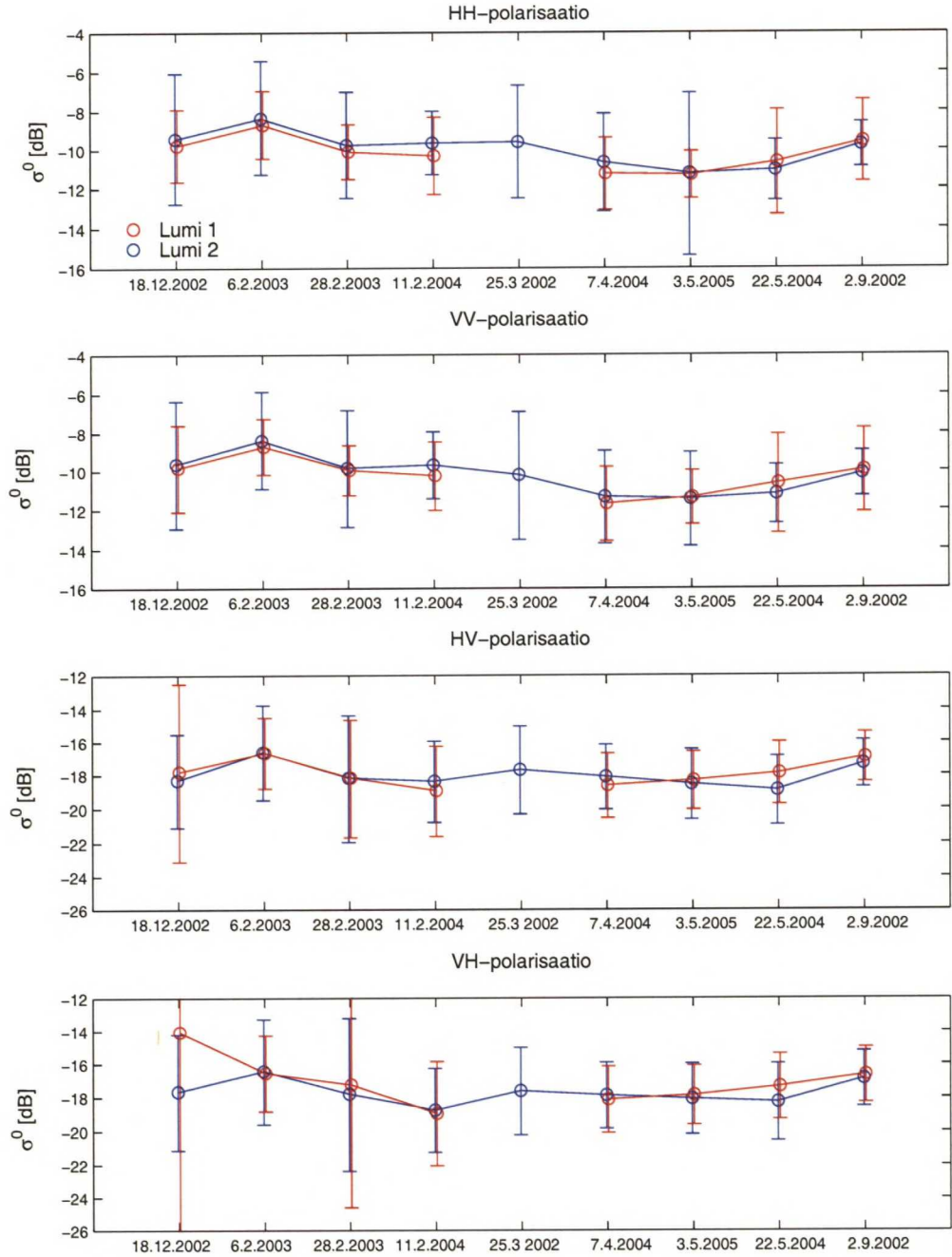
Kuva 6.2: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 45° taajuus 5,4 GHz

Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattu σ^0 ja keskihajonta – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz



Kuva 6.3: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 23° taajuus 9,8 GHz

Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattu σ^0 ja keskihajonta – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz



Kuva 6.4: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 45° taajuus 9,8 GHz

6.1 Lumipeitteen vaikutus

Yleisen lumitilanteen vaikutuksen tutkimista varten valittiin tehdyistä mittauksista neljä eri mittauskertaa edustamaan erilaisia lumitilanteita. Kosteaa lunta valittiin edustamaan 6.2.2003 tehty mittaus, kuivaa lunta 11.2.2004 tehty mittaus, märkää lunta 7.4.2004 tehty mittaus ja lumetonta maata 3.5.2005 tehty mittaus.

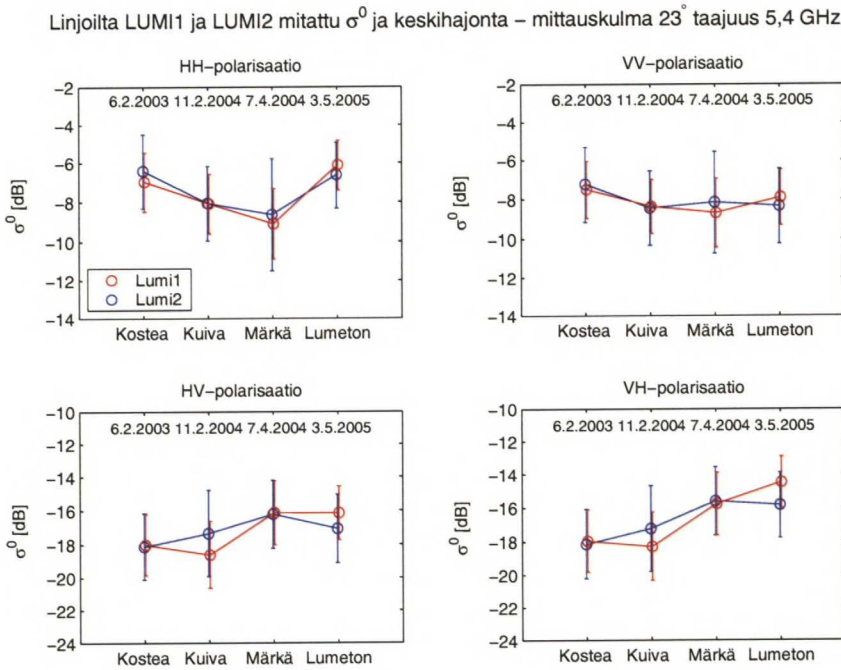
Kolmesta mahdollisesta mittauskerrasta kosteaa lunta valittiin edustamaan 6.2.2003, koska tällöin mitattujen sirontakertoimien keskihajonta oli pienempi kuin kahdella muulla kerralla. 7.4.2004 ei edusta parasta mahdollista märän lumen olosuhdetta, koska lumi oli jo sulanut osasta mittausalueen peltoja. Metsissä märkää lunta oli vielä runsaasti. 7.4.2004 on kuitenkin ainoa mittauspäivä, jona märän lumen olosuhteiden vallitessa mitattiin molemmat linjat kummallakin mittauskulmalla. 11.2.2004 on vastaavasti ainoa onnistunut kuivan lumen mittaus.

Kuvissa 6.5-6.8 on esitetty koko linjan matkalta mitatun sirontakertoimen keskiarvot ja -hajonnat eri lumiolosuhteissa.

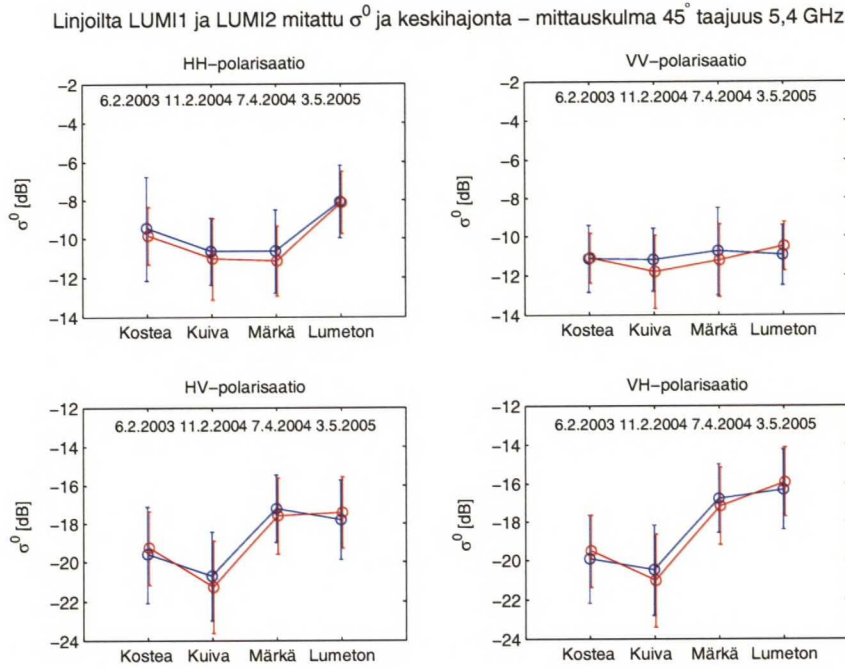
Kuvista 6.5-6.8 voidaan havaita, että sirontakerroin ei laske odotettua 3 dB:ä kaikilla kanavilla lumen muuttuessa kuivasta märäksi [16]. Ristipolarisaatioilla sirontakerroin kasvaa tai pysyy samana lumen kostuessa. Tulos vihjaa, että ristipolarisaatioilla mitattu sirontakerroin riippuu kasvillisuuden ominaisuuksista enemmän kuin lumesta.

Yhdensuuntaispolarisaatioilla mitattu sirontakerroin laskee odotetusti hieman lumen muuttuessa kuivasta märäksi. Lasku on suurempaa 9,8 GHz:n taajuudella kuin 5,4 GHz:n taajuudella. Tämä on sopusuhteissa Jääskeläisen toteamuksen kanssa, jonka mukaan 9,8 GHz:n taajuus soveltuu hieman paremmin lumen ominaisuuksien kaukokartoitukseen kuin 5,4 GHz:n taajuus [20].

Kuvaajista huomataan myös, että erityisesti 9,8 GHz:n taajuudella kostean lumen peittämisestä maasta mitatut sirontakertoimet ovat selvästi kuivan lumen peittämisestä maasta mitattuja suurempia. Eroa on 9,8 GHz:n yhdensuuntaispolarisaatioilla jopa 3 dB. On syytä huomata, että kuivan ja kostean lumen mittaukset on tehty eri talvina. Vaikka mitatuissa lumen ominaisuuksissa ei ole suuria eroja, on lumipeitteen rakenne ollut erilainen. Helmikuussa 2002 lumi oli voimakkaammin deformatunutta eli lumipeitteen sisällä olleet jääkerrokset olivat paksumpia ja tiiviimpiä kuin helmikuussa 2003.

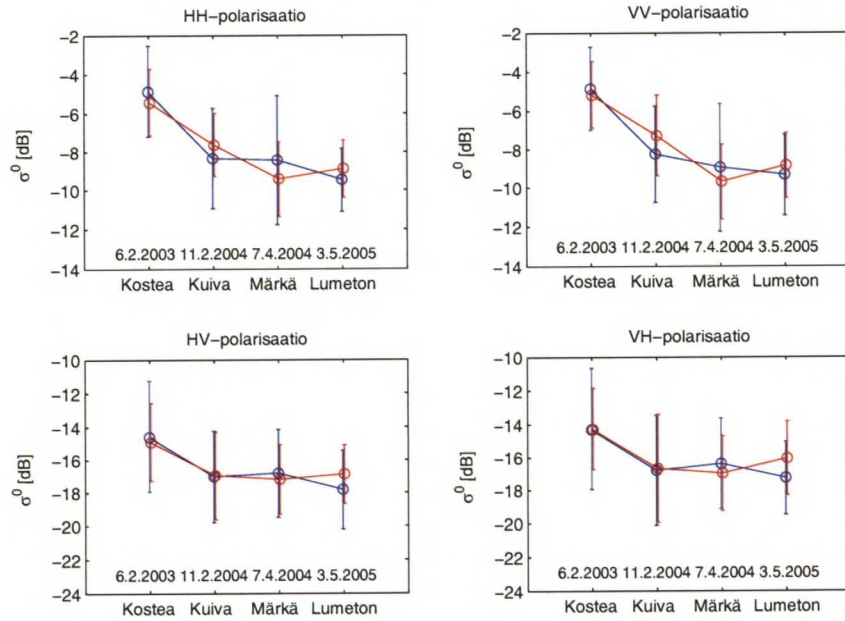


Kuva 6.5: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 23° , taajuus 5,4 GHz



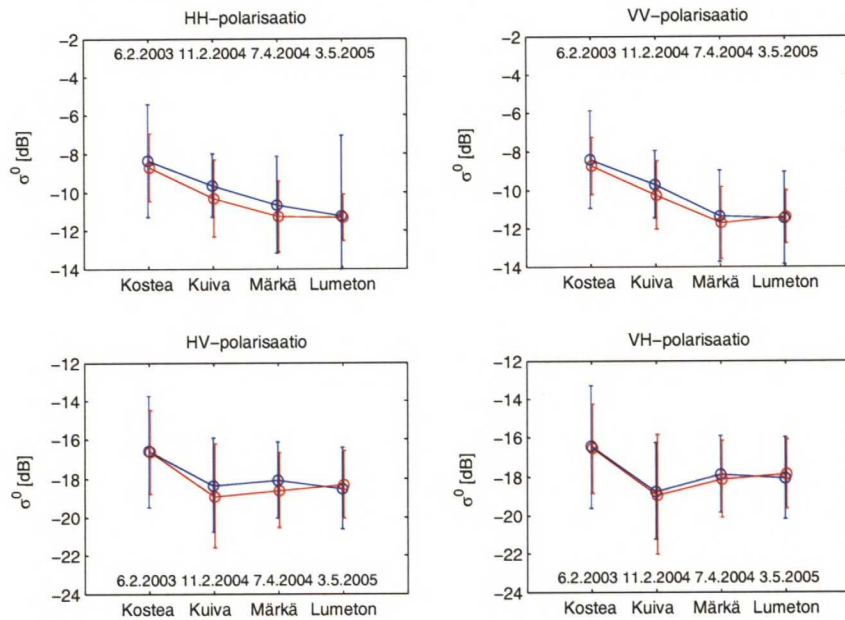
Kuva 6.6: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 45° , taajuus 5,4 GHz

Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattu σ^0 ja keskihajonta – mittauskulma 23° taajuus 9,8 GHz



Kuva 6.7: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz

Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattu σ^0 ja keskihajonta – mittauskulma 45° taajuus 9,8 GHz



Kuva 6.8: Linjoilta LUMI1 ja LUMI2 mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz

Sirontakertoimen lasku on selvempää 23° mittauskulmalla kuin 45° mittauskulmalla. Tämä on järkeenkäypää, koska suuremmalla mittauskulmalla tutkasignaali joutuu kulkemaan pidemmän matkan kasvillisuuden läpi. Tällöin metsä vaimentaa tutkasignaalia enemmän kuin pienemmällä mittauskulmalla, ja lumipeitteen vaikutus sirontakertoimeen pienenee.

5,4 GHz:n VV-polarisaatio ei mittausten mukaan juurikaan reagoi lumitilanteen muuttumiseen. 5,4 GHz:n HH-polarisaatio sen sijaan reagoi ennustetulla tavalla, eli 23° mittauskulmalla mitattu sirontakerroin laskee hieman lumipeitteen kostuessa. Tämä selittyy osaksi sillä, että VV-polarisaatio reagoi enemmän pystysuoriin sirottajiin, tässä tapauksessa puiden runkoihin.

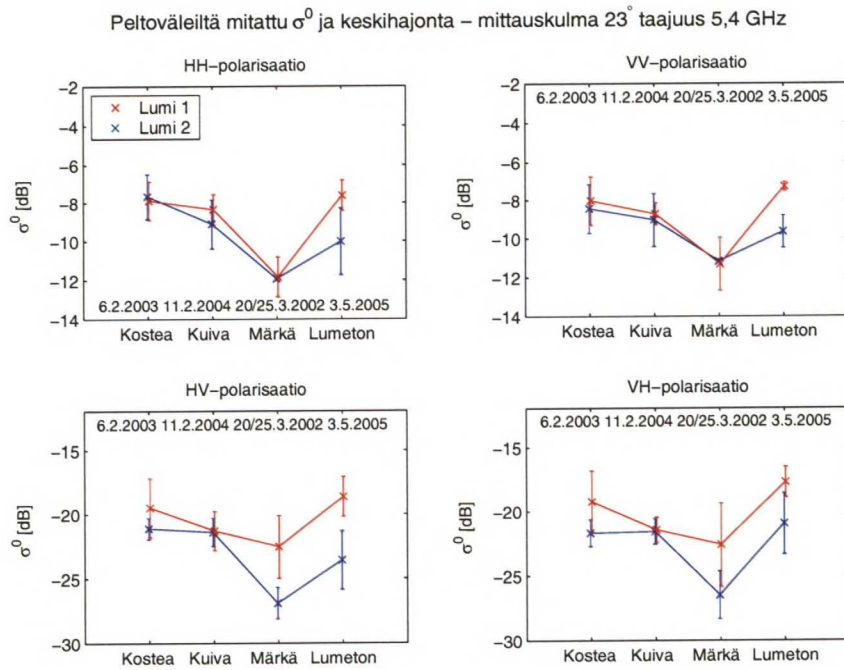
Kuvista 6.5-6.8 voidaan tehdä johtopäätös, että 9,8 GHz:n HH- ja VV-kanavat soveltuvat lumitilanteen kaukokartoitukseen muita käytettyjä kanavia paremmin. Mitattu sirontakertoimen lasku oli parhaimmillakin kanavilla (9,8 GHz HH ja VV) lähempänä Magagin [15] havaitsemaa 1 dB:n laskua kuin Koskisen [16] havaitsemaa 3 dB:n laskua.

Lumipeitteen vaikutusta tutkittiin myös erilaisille maastotyypeille. Molemmilta linjoilta valittiin kolme tarkasteluväliä, joista kaksi edusti metsää ja yksi peltoa. Kuvissa 6.9-6.12 on esitetty peltoaukeilta eri lumitilanteissa mitattu sirontakerroin. Kuten aiemmin on todettu, märkää lunta mitattaessa 7.4.2004 osassa peltoja oli jo lumettomia päiviä. Tämän takia kuvaajissa 6.9-6.12 esitetyt märän lumen arvot on mitattu maaliskuussa 2002. Maaliskuussa 2002 ei mitattu ollenkaan linjaa LUMI1 45° mittauskulmalla, jonka takia tämä piste puuttuu kuvaajista 6.10 ja 6.12.

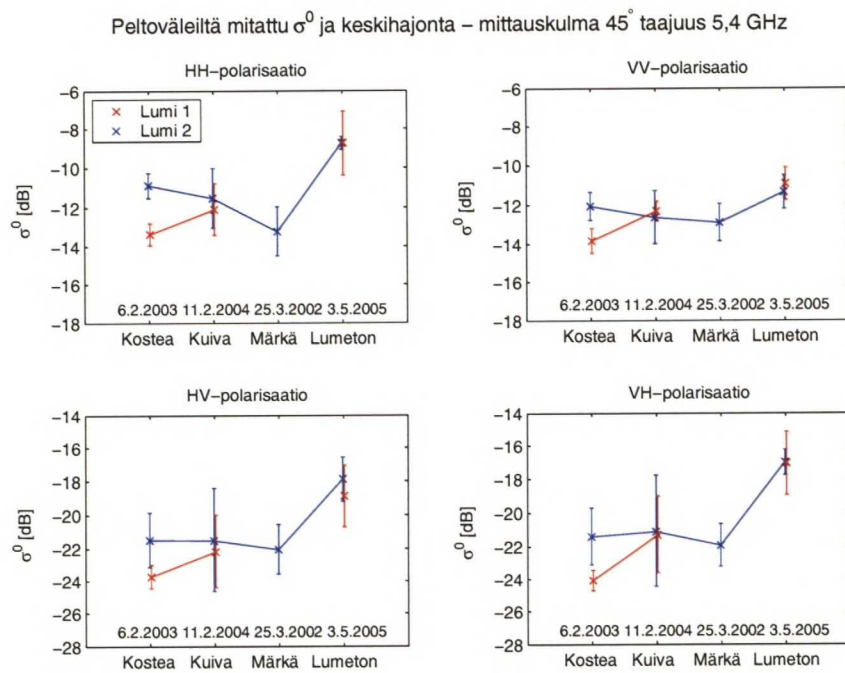
Taulukko 6.1: Valitut peltotarkasteluvälit

Väri	Pituus [m]	Pituus [pikseliä]
Sininen	100	5
Punainen	100	5

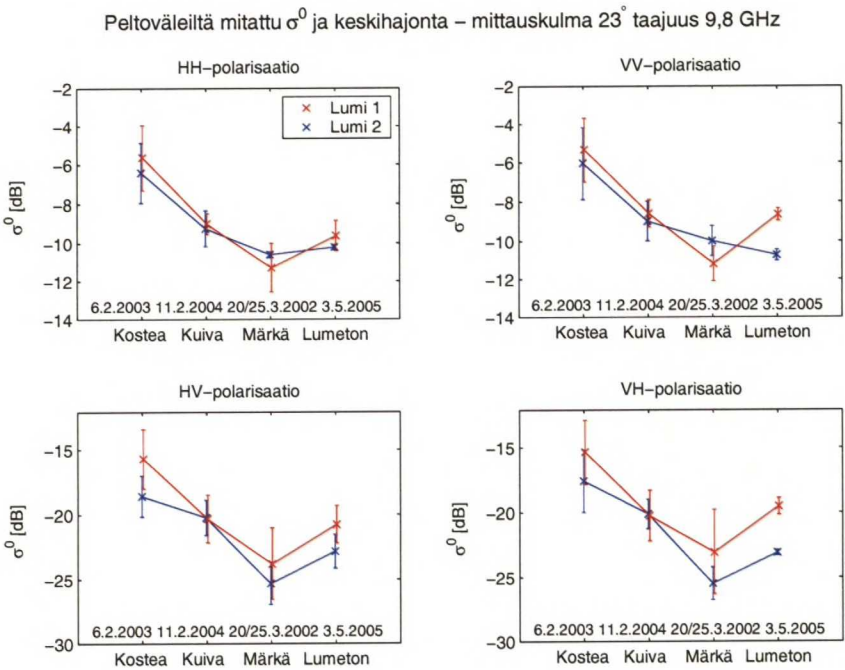
Mittaustuloksista voidaan havaita, että lumipeitteen vaikutus pellolta mitattuun sirontakertoimeen on suurempi kuin pellon ja metsän yhdistelmästä mitattuun. Eri taajuuksien ja kanavien väliset erot ovat pienempiä kuin koko linjaa tarkasteltaessa. Tämä on järkeenkäypä tulos, koska pelloilla ei ole puustoa, johon eri polarisaatiot reagoisivat eri tavalla.



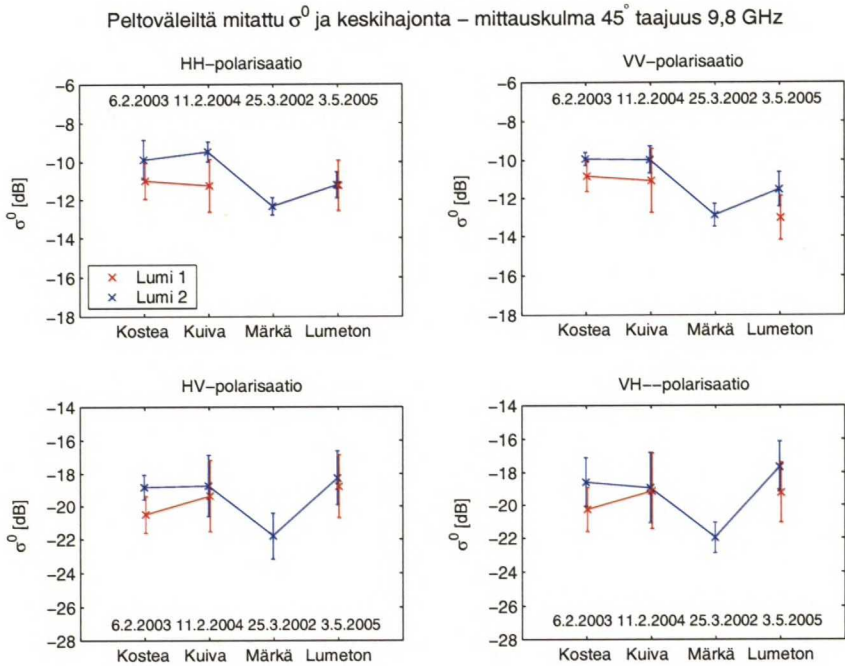
Kuva 6.9: Peltoaukeilta mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat 23° 5,4 GHz. Katso taulukko 6.1



Kuva 6.10: Peltoaukeilta mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat 45° 5,4 GHz. Katso taulukko 6.1



Kuva 6.11: Peltoaukeilta mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat 23° 9,8 GHz. Katso taulukko 6.1



Kuva 6.12: Peltoaukeilta mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat 45° 9,8 GHz. Katso taulukko 6.1

Vaikka pelloilla oli enemmän lunta maaliskuussa 2002 kuin huhtikuussa 2004, lumi ei enää maaliskuussakaan tehdyillä lennoilla peittänyt peltoja tasaisesti. Keskellä peltoaukeita lumen alta oli jo paljastunut maata, ja aukean reunoilla lumipeite oli paksumpi. Kuvassa 5.4 on nähtävissä lumitilanne osassa linjaa LUMI1. Jos peltoja olisi peittänyt tasainen, märkä lumi, mitattu sirontakerroin olisi luultavasti ollut nyt mitattua matalampi.

Pelloilta eri lumitilanteissa tehtyjen mittausten perusteella voidaan todeta tutkimittauksen soveltuvan erittäin hyvin yleisen lumitilanteen seurantaan aukeilta alueilta.

Sirontakertoimen kehitystä tutkittiin myös metsän peittämällä alueilla. Metsäväleiltä mitatut sirontakertoimien keskiarvot ja -hajonnat on esitetty kuvissa 6.13-6.16. Eri tarkasteluvälit on esitetty eri väreillä, ja eri metsävälien ominaisuudet on esitetty taulukossa 6.2.

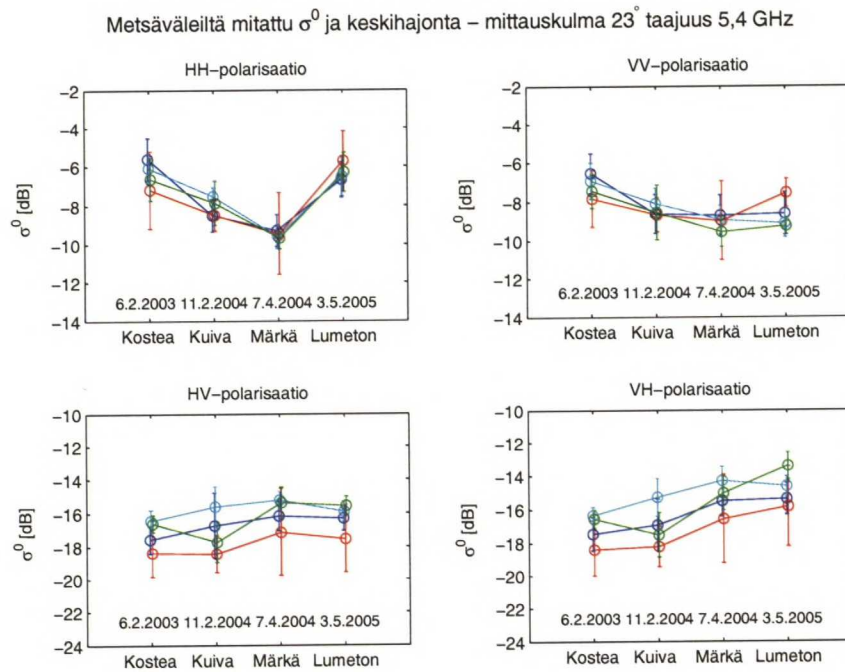
Taulukko 6.2: Valitut metsätarkasteluvälit

Väri	Pituus [m]	Pituus [pikseliä]	Puulaji	Runkotilavuus [m ³ /ha]
Vihreä	200	10	Kuusi	350
Sininen	400	20	Kuusi ja mänty	300
Sinivihreä	200	10	Mänty	290
Punainen	300	15	Mänty, kuusi ja koivu	150

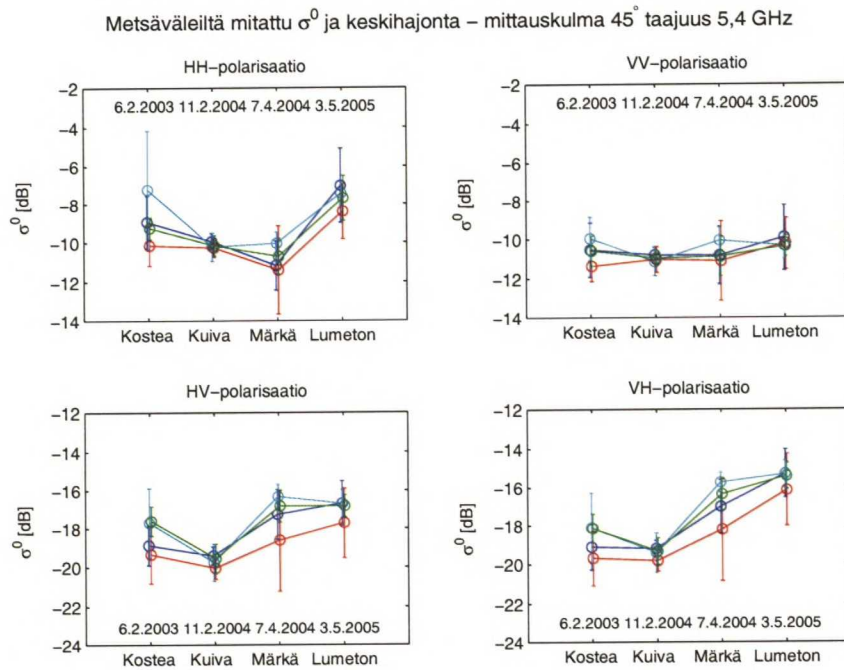
Taulukon 6.2 runkotilavuuksien arvot on mitattu yksittäisellä hypsometri- ja relaskooppi-mittauksella tarkasteluvälillä. Runkotilavuuden arviointia vaikeutti huomattavasti Tuusulan koealueen maastokuviodien pieni koko: runkotilavuus saattoi vaihdella voimakkaasti muutaman kymmenen metrin matkalla. Tämän takia mitatut runkotilavuudet kannattaa käsittää suuruusluokkina, ei tarkkoina arvoina.

Kuvaajissa on huomattavissa sama ilmiö kuin koko linjan matkalta keskiarvoistetuissa sirontakertoimissa: 5,4 GHz:n ristipolarisaatiolla mitattu sirontakerroin kasvaa lumen muuttuessa kuivasta märäksi. Tämä vahvistaa johtopäätöstä, että ristipolarisaatiot reagoivat pääasiassa kasvillisuuteen, tässä tapauksessa puustoon.

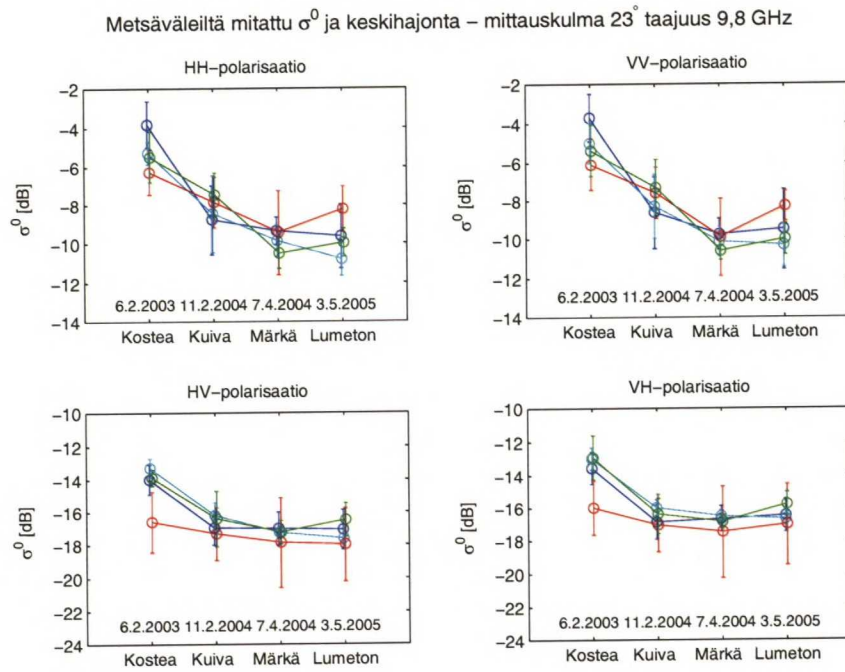
Molempien taajuuksien yhdensuuntaispolarisaatioilla mitatut sirontakertoimet laskevat odotetusti lumen muuttuessa kuivasta märäksi, poikkeuksena 5,4 GHz:n VV-polarisaatio. Koska HH- ja VV-polarisaatiolla mitatuissa lumen peittämän maan sirontakertoimissa ei pitäisi olla eroa [13], on eron johdettava puuston vaikutuksesta. Samalla kun lumipeitteen kostuessa sironta lumipeitteestä pienenee, puuston kostuessa sironta puustosta kasvaa [23]. VV-polarisaatiolla puiden rungoista tapahtuva sironta on voimakkaampaa kuin HH-polarisaatiolla, koska puiden rungot ovat VV-polarisaation sähkökentän suuntaisia.



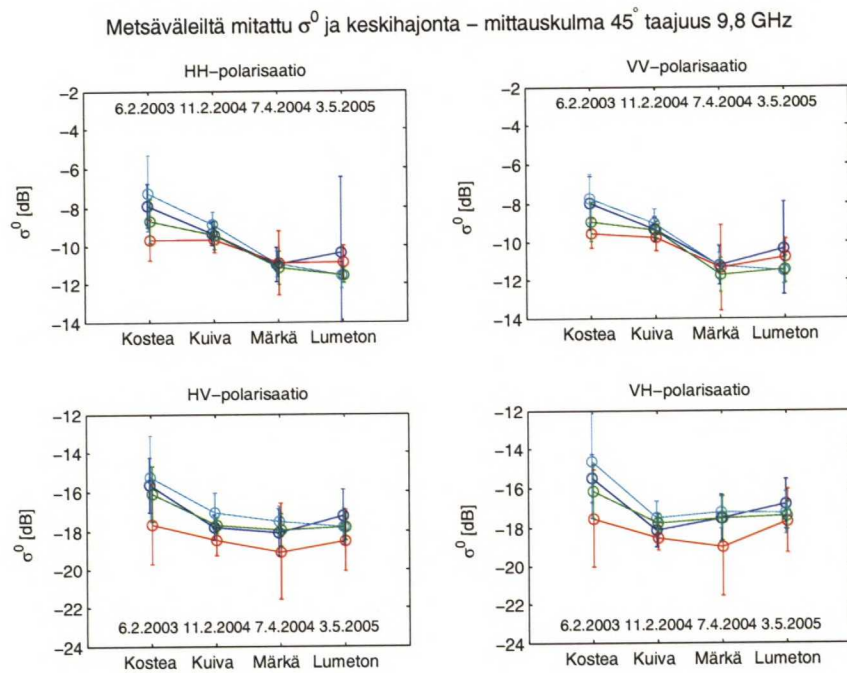
Kuva 6.13: Metsäväleiltä mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 23° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.2



Kuva 6.14: Metsäväleiltä mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 45° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.2



Kuva 6.15: Metsäväleiltä mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.2



Kuva 6.16: Metsäväleiltä mitattujen sirontakerrointen keskiarvot ja keskihajonnat – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.2

Sirontakertoimen lasku lumen kostuessa on selvempää 9,8 GHz:n kuin 5,4 GHz:n taajuudella, kuten oli koko linjaa tarkasteluvälinä käytettäessäkin. 9,8 GHz:n yhdensuuntaispolarisaatioiden välillä ei ole havaittavissa vastaavaa eroa kuin 5,4 GHz:n yhdensuuntaispolarisaatioiden välillä. Tästä voidaan päätellä, että 9,8 GHz:n taajuudella metsä ei häiritse lumen ominaisuuksien tutkimista yhtä paljon kuin 5,4 GHz:n taajuudella.

Mittaustulosten perusteella tutkimista 9,8 GHz:n HH- ja VV-kanavilla voidaan käyttää yleisen lumitilanteen kaukokartoitukseen paitsi pelto- ja metsäalueilla, myös näiden yhdistelmillä. Tämä vahvistaa Koskisen [16] ja Jääskeläisen [20] aiempia tuloksia.

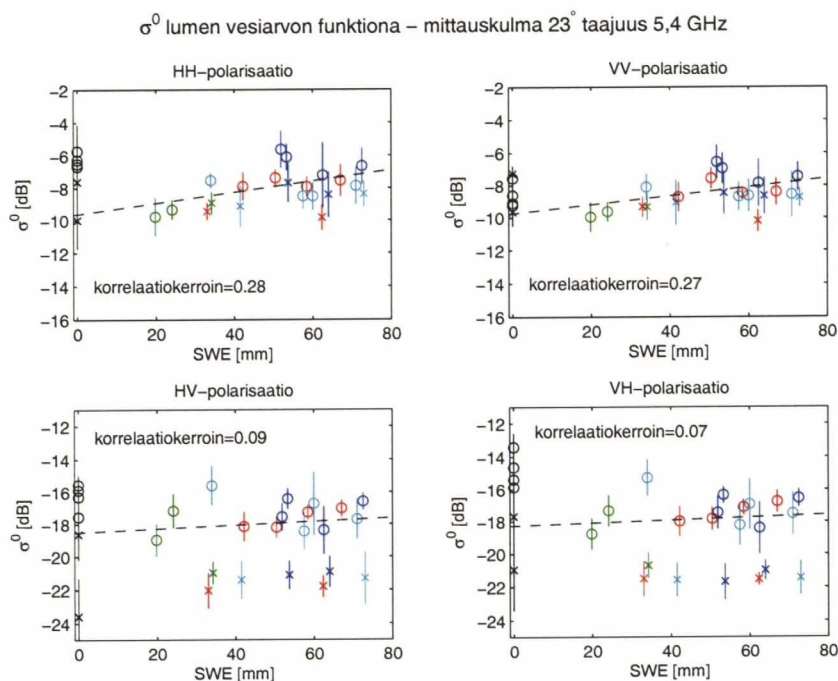
6.1.1 Lumen vesiarvo

Lumen vesiarvon vaikutusta mitattuun sirontakertoimeen tutkittiin yhdistämällä tarkasteluvälin sirontakertoimen keskiarvoon läheisestä maastomittauspisteestä mitattu lumen vesiarvo. Mitattujen lumen vesiarvon ja sirontakertoimen välinen korrelaatio laskettiin. Mitatut arvot, niiden välinen korrelaatio sekä pisteisiin sovitettu suora on esitetty kuvissa 6.17-6.20. Eri värit kuvaavat eri mittauspäiviä taulukon 6.3 mukaisesti. Symboli \circ tarkoittaa, että tarkasteluvälin maasto on ollut metsää, ja symboli \times tarkoittaa tarkasteluvälin maaston olleen peltoa.

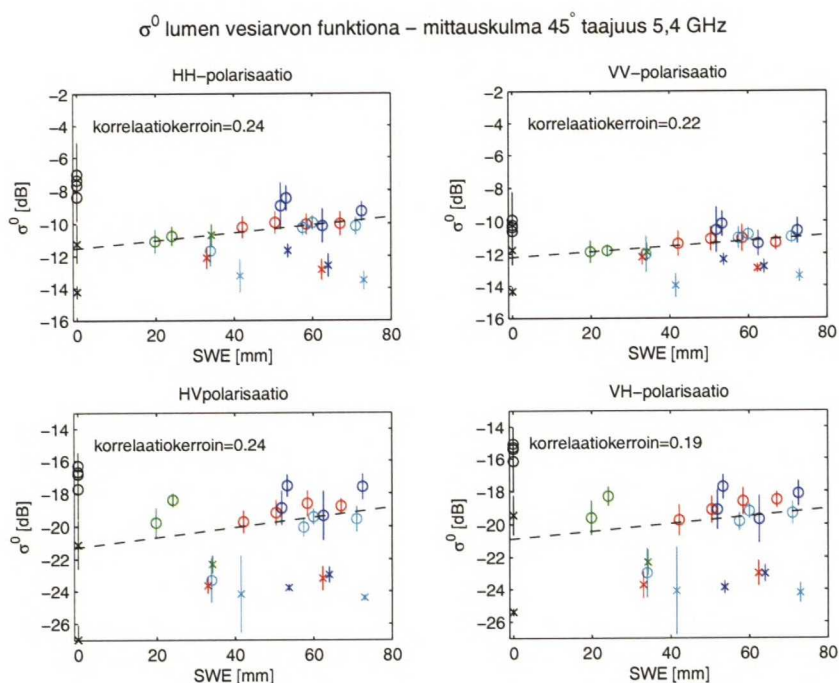
Lumen vesiarvon vaikutusta sirontakertoimeen tutkittiin vain kuivan tai kostean lumen tapauksissa, koska kuten luvussa 2 on todettu, tutkasignaali ei pääse tunkeutumaan lumipeitteen yläosia pidemmälle lumen ollessa märkää. Lisäksi lumen kostumisen on jo todettu aiheuttavan sirontakertoimeen merkittävän laskun. Lumettoman maan mittauslento 3.5.2005 on otettu mukaan kuvaajiin edustamaan SWE:n arvoa 0 mm. Lumettoman maan mittauksia ei otettu mukaan suoran sovituksen tai korrelaation laskemiseen, koska monet muutkin sirontaan mahdollisesti vaikuttavat tekijät kuin lumen vesiarvo olivat toukokuussa täysin erilaisia kuin joului- ja helmikuussa tehtyjen mittausten aikana.

Taulukko 6.3: Kuvaajien 6.17-6.32 symbolien selitys

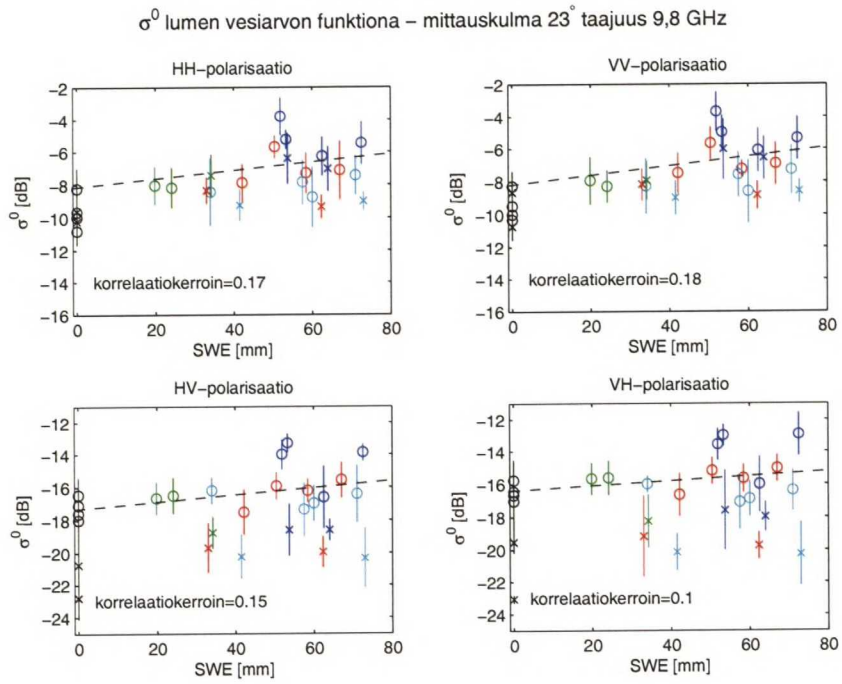
Symboli	Selitys	Lumitilanne
Vihreä väri	18.12.2002	Kostea
Sininen väri	6.2.2003	Kostea
Punainen väri	28.2.2003	Kostea
Sinivihreä väri	11.2.2004	Kuiva
Musta väri	3.5.2005	Lumeton
\circ	Metsä	
\times	Pelto	



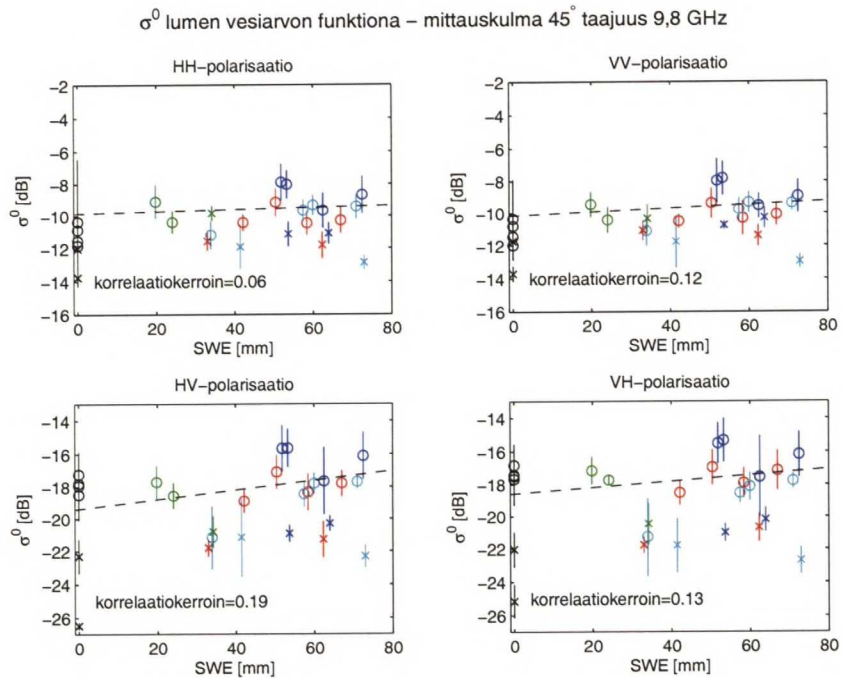
Kuva 6.17: Mitattu sirontakerroin lumen vesiaron funktiona – mittauskulma 23° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.18: Mitattu sirontakerroin lumen vesiaron funktiona – mittauskulma 45° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.19: Mitattu sirontakerroin lumen vesiärvon funktiona – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.20: Mitattu sirontakerroin lumen vesiärvon funktiona – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3

Kuvista 6.17- 6.20 huomataan jo edellisissä alaluvuissa todettu seikka: ristipolarisaatio-kanavilla puustolla on suurempi vaikutus sirontakertoimeen kuin lumella. Peltoaukeilta mitatut sirontakertoimet ovat selvästi pienempiä kuin metsistä mitatut. 5,4 GHz:n HV- ja VH-kanavilla eroa metsästä ja pelloilta mitatun sirontakerrointen välillä on noin 5 dB. 9,8 GHz:n ristipolarisaatiokanavillakin ero on noin 3 dB.

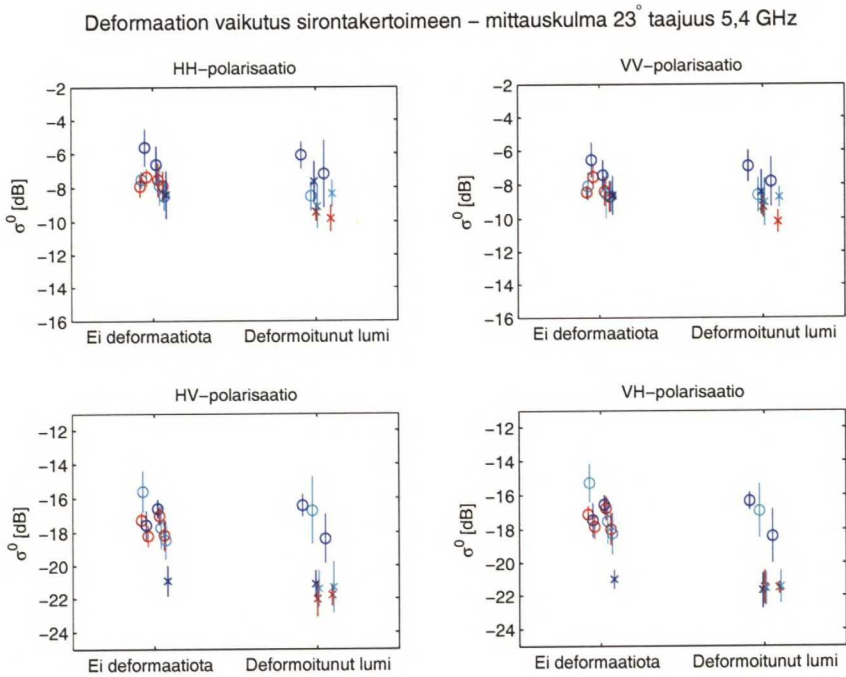
Korrelaatio mitatun sirontakertoimen ja lumen vesiärvon välillä on kaikilla kanavilla merkityksetöntä. Yhdensuuntaispolarisaatioilla, erityisesti 5,4 GHz:n HH- ja VV-kanavilla kuvassa 6.17, on havaittavissa sirontakertoimen kasvu vesiärvon kasvaessa. Pienimmät sirontakertoimet ja lumen vesiärvot on mitattu samana päivänä 18.12.2002. Vastaavasti 6.2.2003 on mitattu suuria lumen vesiärhoja sekä hieman muita päiviä korkeampia sirontakertoimen arvoja. Kuitenkin korrelaatiokerroin on alle 0,3. Yhden päivän aikana mitattujen sirontakerrointen ja lumen vesiärvöjen välillä ei kuvissa ole havaittavissa riippuvuutta. Saatu tulos ei ole yllättävä. Mt. Mammothin mittauksissa on saatu samanlaisia tuloksia jo 90-luvulla [14] [25].

Suurimmatkin kampanjan aikana mitatut Tuusulan koealueelle tyypilliset SWE:n arvot olivat pieniä kirjallisuudessa mainittuihin arvoihin verrattuna. Tutkamittausta voidaan mahdollisesti käyttää lumen vesiärvon määrittämiseen, joskin vasta huomattavasti suuremmille SWE:n arvoille kuin mitä EnviSnow -kampanjassa mitattiin.

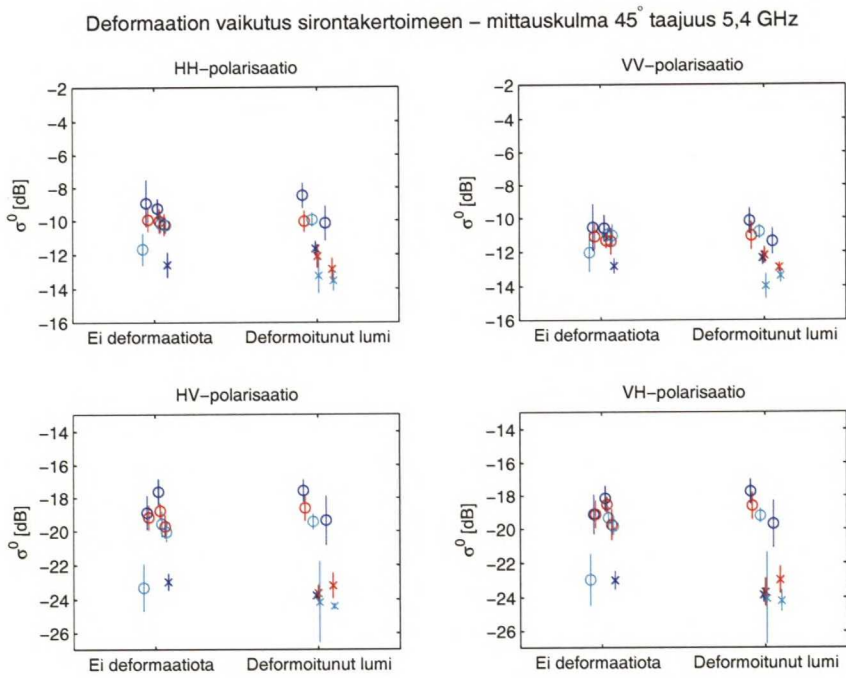
6.1.2 Deformoitunut lumi

Lumen sulaminen ja uudelleen jäätyminen eli lumen deformaatio on hyvin tavallinen ilmiö Etelä-Suomessa. Uudelleen jäätyvä lumi muodostaa kovan jäisen kerroksen, jonka päälle mahdollisesti sataa uutta lunta. Näin voi lumipeitteen sisään syntyä useitakin päällekkäisiä jääkerroksia, joiden välissä on lunta. Lumihaarukalla tehdyt mittaukset osoittivat, että jäisen kerroksen permittiivisyys poikkeaa välissä olevien lumikerrosten permittiivisyydestä. Tällöin on perusteltua odottaa, että deformatuneen lumen sirontakerroin eroaa deformatumattoman lumen sirontakertoimesta.

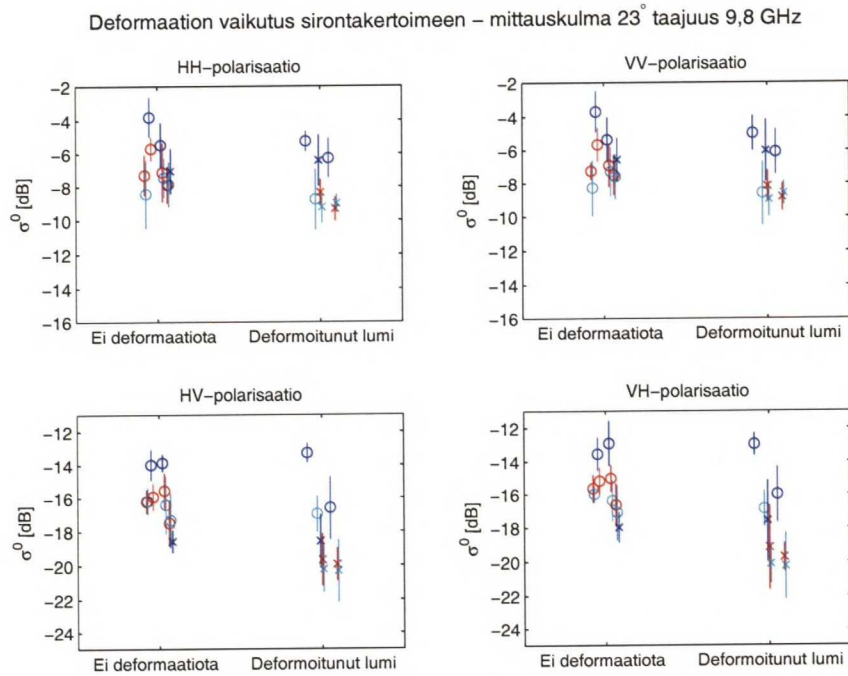
Deformaation vaikutusta tutkittiin jakamalla mitatut sirontakertoimet kahteen osaan: niihin, jotka on mitattu sellaisen maastomittauspisteen läheisyydestä, jossa lumi oli deformatunutta sekä niihin, jotka on mitattu sellaisen maastomittauspisteen läheisyydestä, jossa lumi ei ollut deformatunutta. Kuvissa 6.21-6.24 on esitetty mitatut sirontakertoimet tämän jaon mukaisesti.



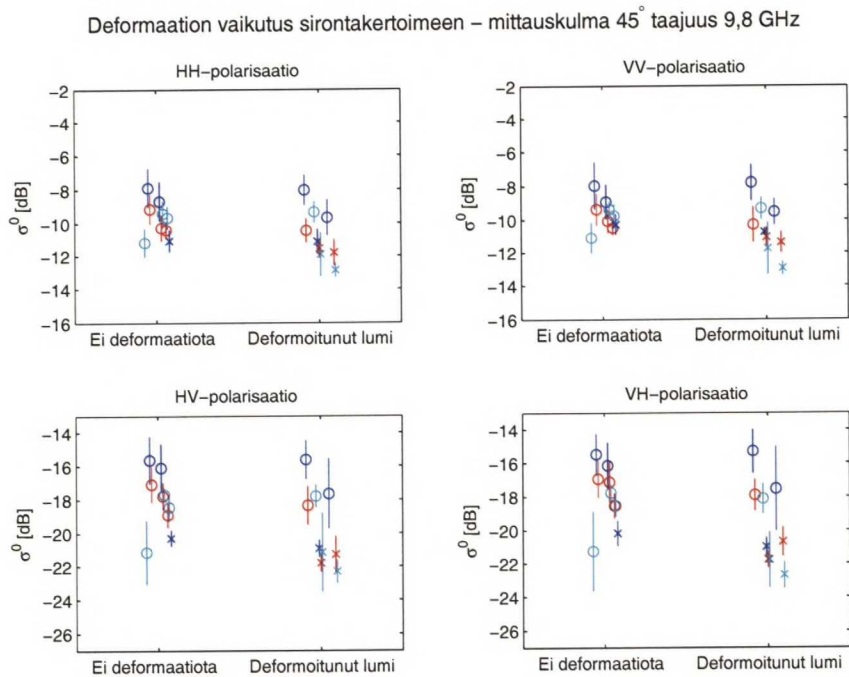
Kuva 6.21: Mitattu sirontakerroin ja lumen deformaation vaikutus – mittauskulma 23°, taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.22: Mitattu sirontakerroin ja lumen deformaation vaikutus – mittauskulma 45°, taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.23: Mitattu sirontakerroin ja lumen deformaation vaikutus – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3



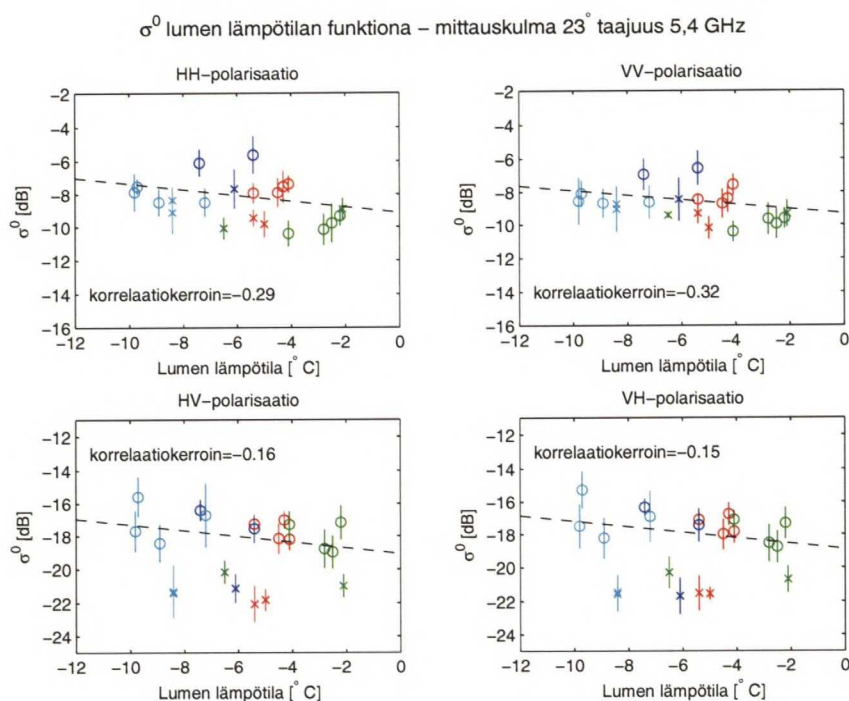
Kuva 6.24: Mitattu sirontakerroin ja lumen deformaation vaikutus – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3

Kuvista 6.21-6.24 huomataan, että lumen deformaatiolla ei näytä olevan vaikutusta mitattuun sirontakertoimeen. Yhdensuuntaispolarisaatioilla mitatut sirontakertoimet ovat samaa tasoa, oli lumi deformoitunutta tai ei.

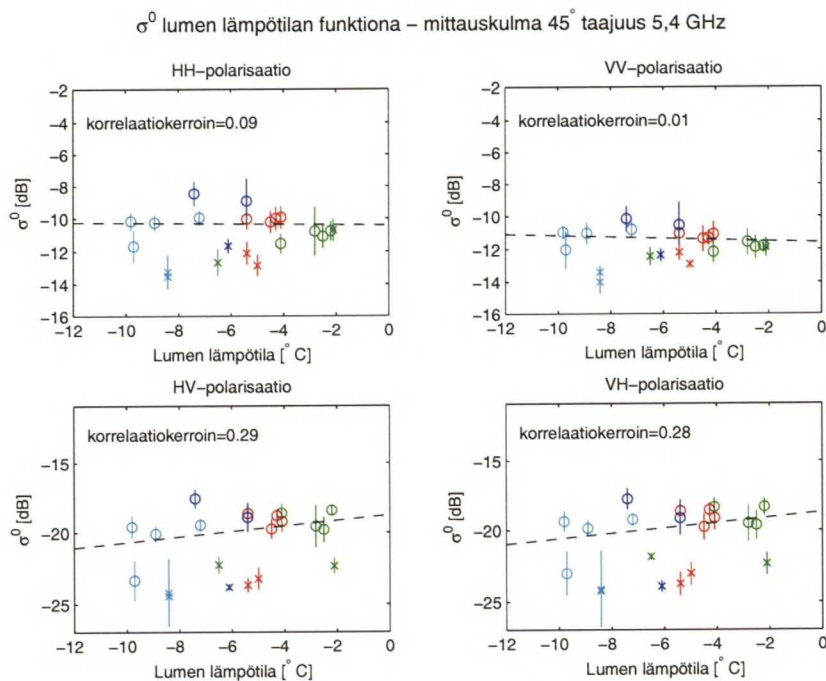
Mittauspisteistä, joissa lumi ei ollut deformoitunutta, yhdeksän kymmenestä sijaitti metsässä. Näin ollen voidaan olettaa maaston vaikuttavan deformoituneen lumen muodostumiseen. Tämä johtaa taas siihen, että alueet joilla deformaatiota todennäköisemmin tapahtuu, tässä tapauksessa peltoaukeat, erottuvat deformoitumattoman lumen alueista matalammasta sirontakertoimesta ristipolarisaatioilla.

6.1.3 Lumen lämpötila

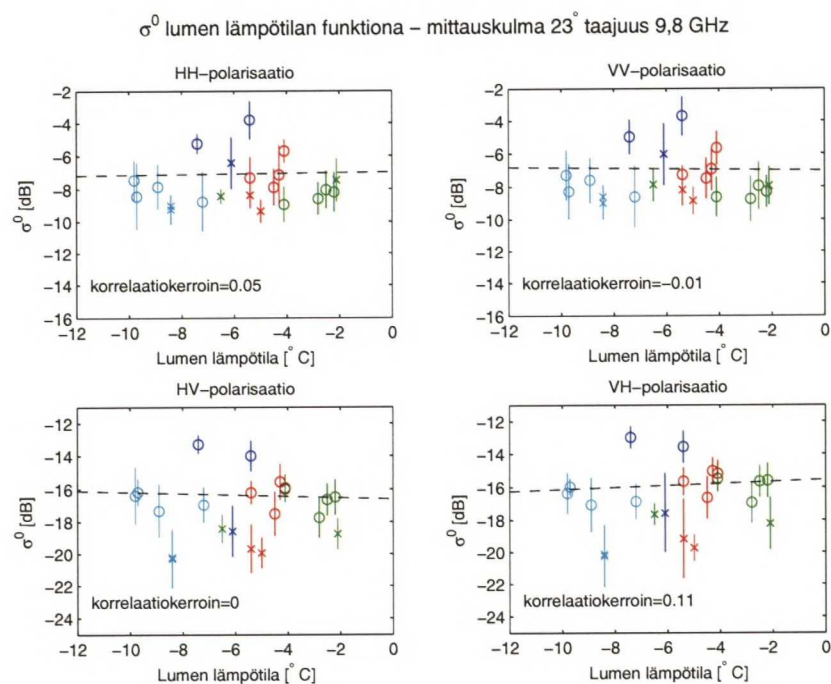
Lumen vesiarvon lisäksi lumesta mitattiin myös lämpötila. Kuvissa 6.25-6.28 on esitetty mitattu sirontakerroin ja keskihajonta lumipeitteen lämpötilan funktiona sekä pisteisiin sovitettu suora. Lumen lämpötilan arvona käytettiin eri syvyyksiltä mitattujen lämpötilojen keskiarvoa.



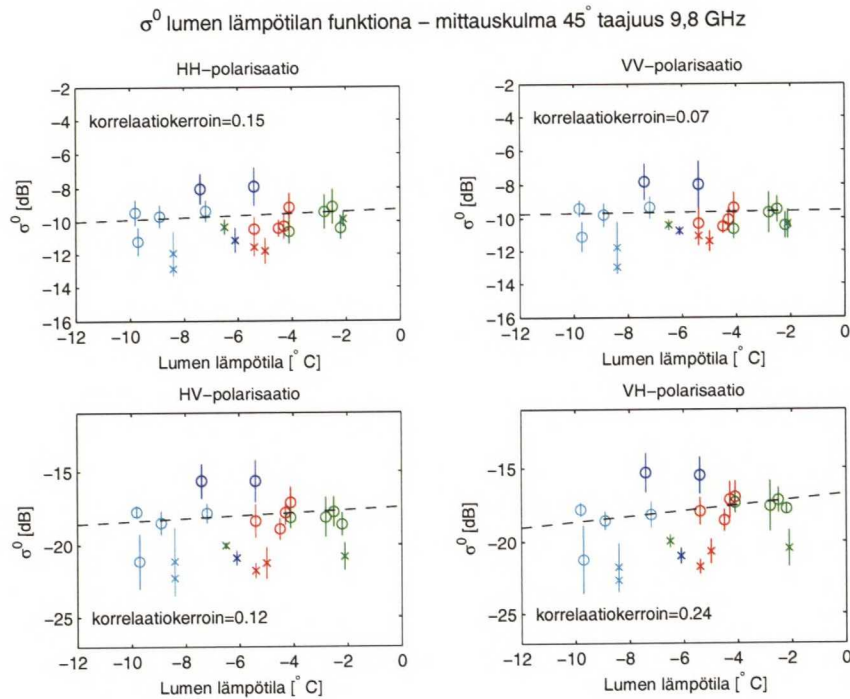
Kuva 6.25: Mitattu sirontakerroin lumen lämpötilan funktiona – mittauskulma 23° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.26: Mitattu sirontakerroin lumen lämpötilan funktiona – mittauskulma 45° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.27: Mitattu sirontakerroin lumen lämpötilan funktiona – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.28: Mitattu sirontakerroin lumen lämpötilan funktiona – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3

Kuvista 6.25-6.28 käy ilmi, että lumen lämpötilalla ei ole havaittavaa vaikutusta sirontaan. Mitatun sirontakertoimen ja lumen lämpötilan välinen korrelaatio on merkityksetön kaikilla kanavilla. Kuvaajista voidaan huomata, että eri mittauspäivät erottuvat toisistaan selvinä ryhminä. Tämä johtunee siitä, että lumen lämpötila riippuu pääosin mittauksen edeltäneestä säästä. Sää ennen mittauksia on ollut samankaltainen koko mittausalueella.

Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että kuivan tai kostean lumen lämpötila ei ainakaan Etelä-Suomelle tyypillisissä lumiolosuhteissa vaikuta havaittavasti takaisinsirontaan. Tämä ei ole yllättävää, koska lämpötilan vaikutus lumen permittiivisyyteen on melko pieni, kunhan lämpötila pysyy selvästi nollan alapuolella.

6.2 Maanpinnan vaikutus

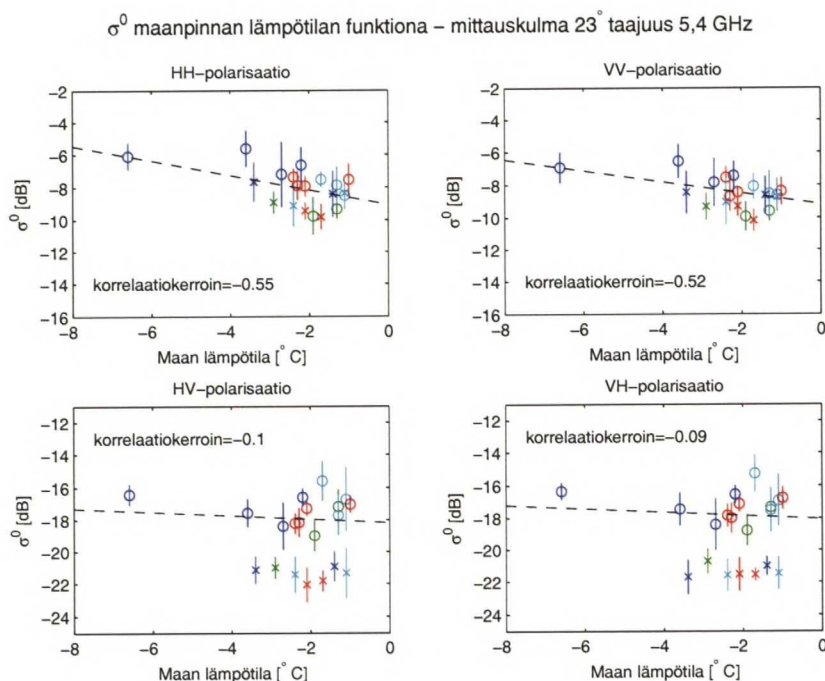
Mitattaessa C- tai X-alueen tutkalla kuivaa tai kostea lumipeitettä Etelä-Suomessa on harvinaista että lumipeitteen paksuus olisi suurempi kuin käytetyn tutkasignaalin tunkeutumissyvyys. Tämän takia on luultavaa, että lumipeitteen alla oleva maanpinta vaikuttaa mitattuun sirontakertoiimeen. Shin mukaan maanpinnan vaikutus mitattuun sirontakertoiimeen on merkittävä [14], Koskisen mukaan taas miltei merkityksetön [16].

Lumipeitteen alla olevan maanpinnan ominaisuuksien mittaaminen on kuitenkin vaikeaa, ja vaikka esimerkiksi maanpinnan epätasaisuuden vaikutuksen tutkiminen olisi mielenkiintoista, ei tällaista mittausta EnviSnow -mittauskampanjan aikana tehty. Tämän takia tässä alaluvussa keskitytään maanpinnan lämpötilan vaikutuksen tutkimiseen.

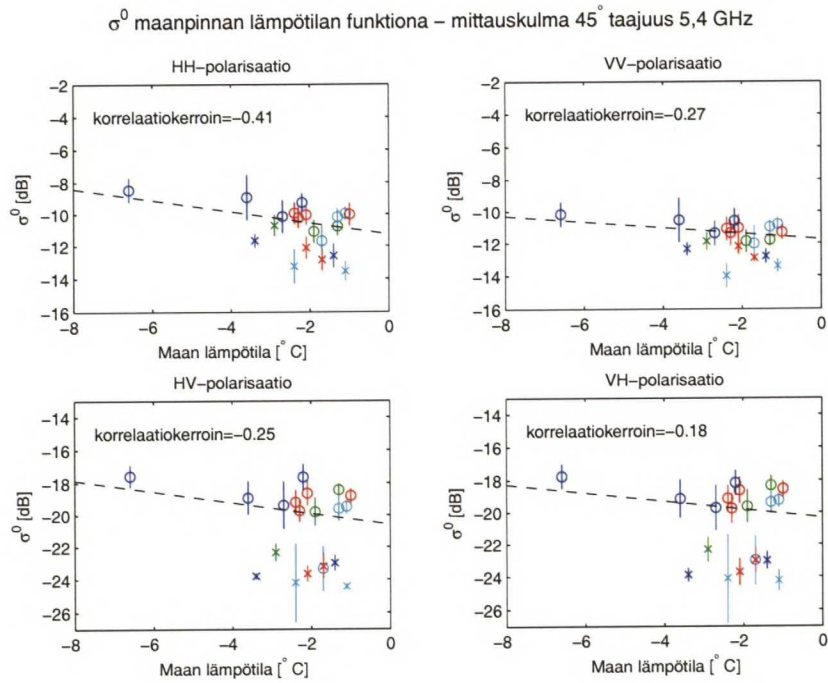
6.2.1 Maanpinnan lämpötila

Lämpötila on helposti mitattava maanpinnan ominaisuus, joka mitattiin säännöllisesti mitauskampanjan aikana. Kuvissa 6.29-6.32 on esitetty mitattu sirontakerroin keskihajontoihin maanpinnan lämpötilan funktiona, näiden välinen korrelaatio sekä pisteisiin sovitettu suora.

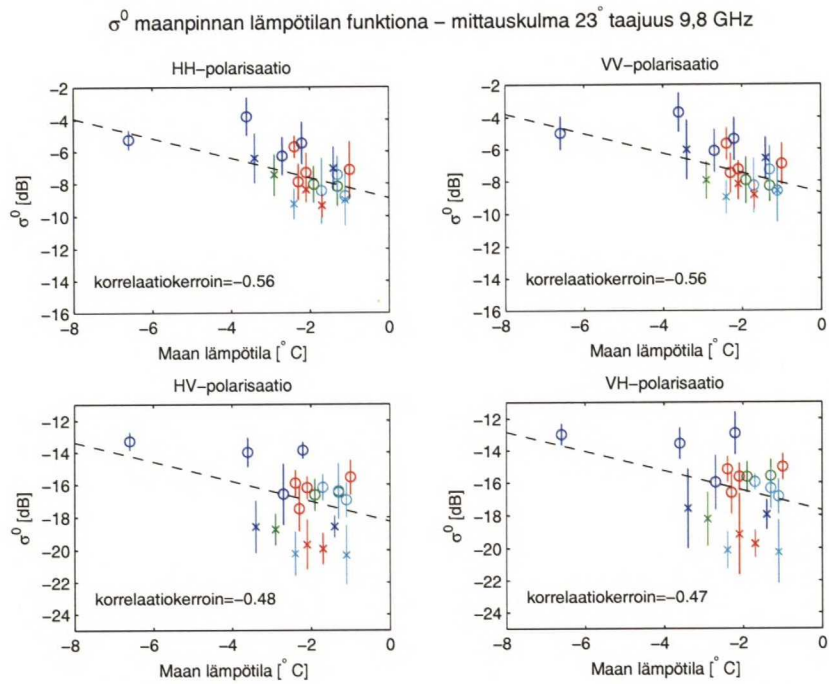
Kuvista 6.29-6.32 huomataan vastaavanlainen ilmiö kuin tutkittaessa lumen vesiarvon vaikutusta: ristipolarisaatiolla mitatut sirontakertoimet jakautuvat kahteen osaan sen mukaan, onko kyseessä metsä- vai peltoalue. Yhdensuuntaispolarisaatioilla mitatun sirontakertoimen ja maanpinnan lämpötilan välillä taas on havaittavissa kohtalainen negatiivinen korrelaatio. Havaittu korrelaatio vihjaa, että maanpinnan sironta on merkittävä osa mitattua sirontaa. Korrelaatio on hieman vahvempaa 23° kuin 45° mittauskulmalla tehdyissä mittauksissa, mikä on järkeenkäypää kun otetaan huomioon, että signaali joutuu suuremmalla mittauskulmalla kulkemaan pidemmän matkan puuston ja lumipeitteen läpi. Tällöin maanpinnan suhteellinen vaikutus sirontakertoimeen pienenee.



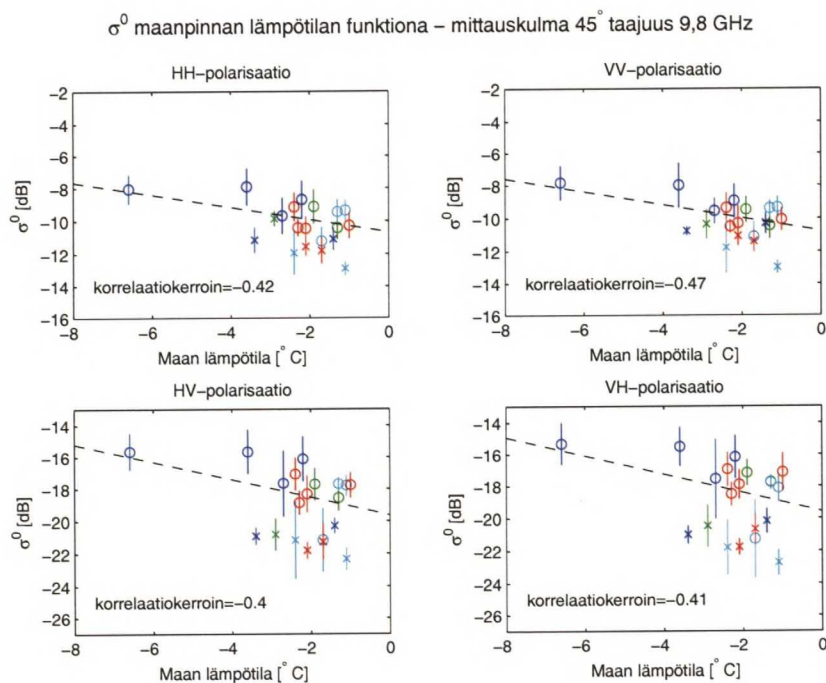
Kuva 6.29: Mitattu sirontakerroin maan lämpötilan funktiona – mittauskulma 23° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.30: Mitattu sirontakerroin maan lämpötilan funktiona – mittauskulma 45° , taajuus 5,4 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.31: Mitattu sirontakerroin maan lämpötilan funktiona – mittauskulma 23° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3



Kuva 6.32: Mitattu sirontakerroin maan lämpötilan funktiona – mittauskulma 45° , taajuus 9,8 GHz. Katso taulukko 6.3

Lumi on hyvä eriste. Tämän vuoksi maanpinnan lämpötilan vaihtelu mittausten aikana on ollut valitettavan pientä. Suurin osa mitatuista lämpötiloista on välillä -1° – -4° C. Pisteet eivät kuitenkaan jakaannu ryhmiksi mittauspäivämäärän mukaan, kuten lumen lämpötilan vaikutusta tarkasteltaessa.

Mittautulosten perusteella sirontakertoimen ja maanpinnan lämpötilan välillä on negatiivinen korrelaatio: sirontakerroin pienenee maanpinnan lämpötilan kasvaessa. Mahdollinen selitys tälle on, että lumipeitteen paksuus ja täten myös lumen vesiarvo vaikuttaisi maan lämpötilaan, ja muutos sirontakertoimessa johtuisi erilaisesta tilavuussironnasta lumen sisällä. Kuitenkin mittauskampanjan aikana mitattujen lumipeitteen paksuuksien ja maanpinnan lämpötilojen välinen korrelaatiokerroin on vain 0,06, eli lumen paksuus ei näytä vaikuttavan maanpinnan lämpötilaan. Luultavampi selitys havaitulle maanpinnan lämpötilan ja mitatun sirontakertoimen yhteydelle on, että maan permittiivisyys muuttuu maan kylmetessä, jolloin sen sirontaominaisuudetkin muuttuvat.

Negatiivinen korrelaatio on melko yllättävä tulos, sillä lämpötilan kasvaessa maahan sitoutuneen nestemäisen veden määrä kasvaa. Tällöin lumipeitteen ja maan välisen rajapinnan tulisi toimia voimakkaampana sirottajana, minkä pitäisi näkyä mitatun sirontakertoimen kasvamisena, etenkin jos maan ja lumen rajapinta on epätasainen. Havaittu negatiivinen korrelaatio ei selity yksinkertaisilla pohdintoilla, vaan sen selittämiseksi tarvitaan lisätutkimuksia. Mahdollisissa tulevaisissa mittauksissa kannattaa kiinnittää huomiota maan ja lumen rajapinnan ominaisuuksiin, erityisesti pinnan epätasaisuuteen.

6.3 Metsän vaikutus

Selvin mittauskampanjan tuloksista on, että ristipolarisaatiokanavat reagoivat erityisesti 5,4 GHz:n taajuudella voimakkaammin kasvillisuuteen kuin lumen ominaisuuksiin. Tämä näkyy esimerkiksi kuvista 6.17 ja 6.18. Ero pelloilta ja metsästä ristipolarisaatioilla mitattujen sirontakertoimien välillä on vähintään 3 dB.

Kuvista 6.13 ja 6.14 voidaan tarkastella runkotilavuuden vaikutusta mitattuun sirontakertoimeen. 23° mittauskulmalla 5,4 GHz:n ristipolarisaatioilla eri tarkasteluväleiltä mitatut sirontakertoimet asettuvat eri tasoille, ja lukuunottamatta kahta mitattua sirontakertoimen arvoa säilyttävät keskinäisen järjestyksensä lumitilanteen vaihdellessa. Väliltä, jolle arvioitiin pienin metsän runkotilavuuden arvo (punainen väri, noin $150 \text{ m}^3/\text{ha}$), mitattiin järjestelmällisesti HV- ja VH-polarisaatioilla pienin sirontakertoimen arvo. Muilta kolmelta väliltä mitatut sirontakertoimet erottuvat omaksi joukokseen noin 1,5 dB korkeammalle.

45° mittauskulmalla eri väleiltä mitatut sirontakertoimet ovat lähempänä toisiaan kuin 23° mittauskulmalla mitatut. Kuvassa 6.14 ristipolarisaatioilla eri väleiltä mitattujen sirontakertoimien välinen ero on aina pienempi kuin niiden keskihajonta.

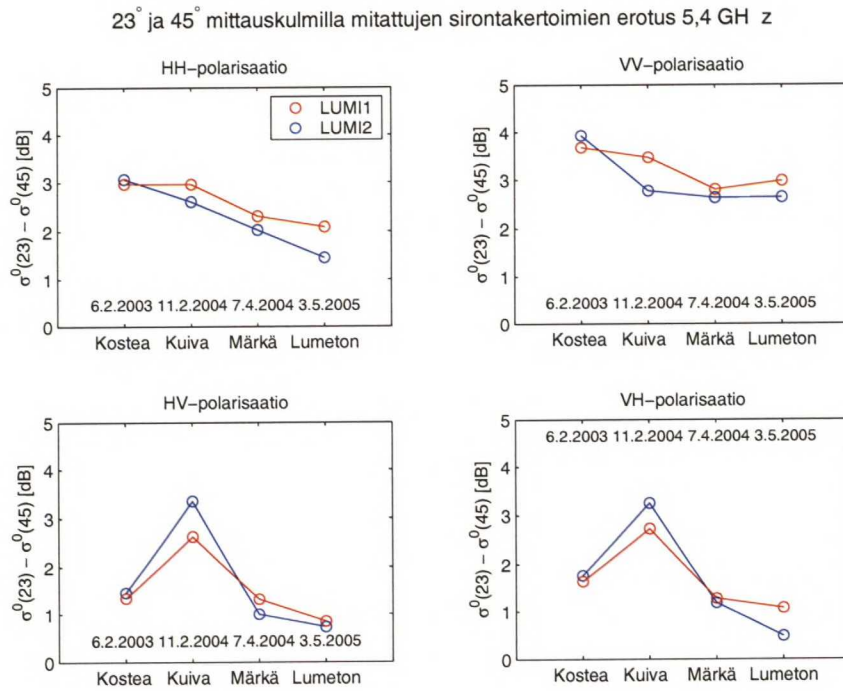
5 GHz:n taajuudella ristipolarisaatiolla tehtävällä tutkimuksella on siis mahdollista erottaa metsä pellosta. Metsän runkotilavuuksien arviointi on myös mahdollista — tiheämpi metsä on tulosten perusteella voimakkaampi sirottaja kuin harva metsä. Kuvaajasta 6.14 huomataan, että kun lumi on kuivaa ja puiden rungot jäässä, ovat eri metsäalueilta mitatut sirontakertoimet hyvin lähellä toisiaan. Lumen kostuessa ja puiden runkojen suolaessa mitattuihin sirontakertoimiin syntyy hajontaa, erityisesti ristipolarisaatioilla. Tämä vahvistaa aiemman tuloksen, jonka mukaan kovalla pakkasella sirontakertoimen muodostumista hallitsee lumen peittämä maa ja sulamiskaudella puusto [23].

Lumen kaukokartoituksen kannalta rohkaiseva tulos on, että 9,8 GHz:n yhdensuuntaispolarisaatioilla ja 5,4 GHz:n HH-kanavalla ei metsän runkotilavuudella näytä olevan havaittavaa merkitystä mitattuun sirontakertoimeen. Tämän tuloksen valossa lumen kaukokartoitus tutkimuksella metsän läpi on mahdollista.

6.4 Mittausgeometrian vaikutus

EnviSnow -mittauskampanjan aikana pyrittiin joka lennolla mittaamaan samat kohteet 23° ja 45° mittauskulmilla. Tässä luvussa mitattuja sirontakertoimien arvoja on vertailtu eri suureisiin kummallakin mittauskulmilla. Yleisesti voidaan todeta, että maan pinnalla sijaitsevien ilmiöiden kuten lumen vesiarvon tai maanpinnan lämpötilan korrelaatio sirontakertoimeen on hieman parempi 23° kuin 45° mittauskulmalla.

Kuvissa 6.33 ja 6.34 on esitetty kahdella eri mittauskulmalla mitattujen sirontakertoimien erotus eri lumiolosuhteissa. Kuvista nähdään, että pienemmällä mittauskulmalla mitattu sirontakerroin on aina ollut suurempi kuin suurella mittauskulmalla mitattu. Tämä on odo-

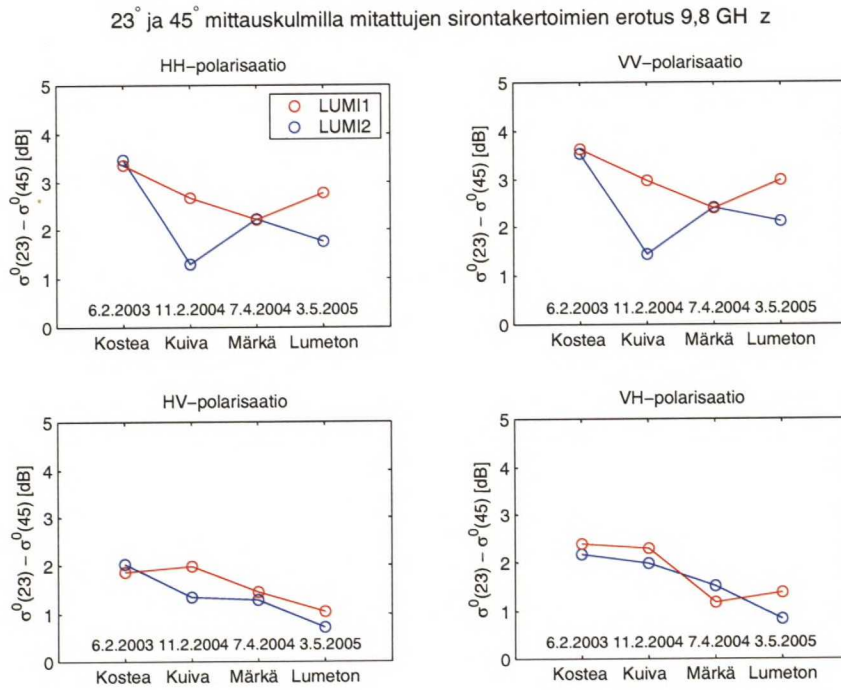


Kuva 6.33: 23° ja 45° mittauskulmilla 5,4 GHz taajuudella mitattujen sirontakertoimien erotus eri lumiolosuhteissa

tettu tulos: sekä Kendran [13] että Koskisen [16] mukaan mitatun sirontakertoimen tulee pienentyä mittauskulman kasvaessa. Ristipolarisaatioilla mittauskulman aiheuttama ero on hieman pienempi kuin yhdensuuntaispolarisaatioilla. Tämäkin on sopusoinnussa Kendran tekemien mittauksien [13] kanssa, jotka on esitetty kuvassa 2.9. Eri mittauskulmilla mitattujen sirontakertoimien ero on kaikilla kanavilla 1-4 dB.

Tarkempien johtopäätösten tekeminen kuvista 6.33 ja 6.34 on hankalaa. On mahdollista, että osa eri mittauskulmien välisestä erosta selittyy sillä, että toisella kulmalla mitattaessa antennin keilaan on osunut hyvin voimakkaita siroittajia kuten rakennuksia, ja toisella kulmalla mitattaessa ei. Mittaukset pyrittiin tekemään niin, että molemmilla kulmilla antennin keila osoitti samaan paikkaan mittaustilinjalla. Kuitenkin kopteri lentää käytännössä aina hieman sivussa mittaustilinjasta: kampanjan aikana virhe oli yleensä kymmenen metrin luokkaa. Tämän lisäksi kopterin kallistuessa muutaman asteen sivusuunnassa muuttuu antennin keilan paikka maan pinnalla useita metrejä. Mittauskulmien ero mitattaessa kuivaa lunta 9,8 GHz:n yhdensuuntaispolarisaatioilla on 2 dB suurempi linjalla LUMI1 kuin linjalla LUMI2. Yleensä ero linjojen välillä on huomattavasti pienempi. Mahdollinen selitys tälle on se, että antennin keila osui rakennuksiin mitattaessa linjaa LUMI2 45° kulmalla, mutta ei 23° kulmalla mitattaessa.

Kuvat 6.33 ja 6.34 osoittavat, että mittauskulman vaikutus on vaihdellut eri lumiolosuhteissa tehdyillä mittauksilla. Tulokset ovat kuitenkin epämääräisiä, erityisesti 9,8 GHz:n yhdensuuntaispolarisaatioilla, jotka ovat tämän tutkimuksen mukaan parhaiten lumen kau-



Kuva 6.34: 23° ja 45° mittauskulmilla 9,8 GHz:n taajuudella mitattujen sirontakertoimien erotus eri lumiolosuhteissa 9,8 GHz

kokartoitukseen soveltuvat kanavat. Tulokset vihjaavat kuitenkin, että yleisellä lumitilanteella on vaikutusta mitatun sirontakertoimen käyttäytymiseen mittauskulman funktiona. Helikopterimittausta paremmin tämän ilmiön tutkimiseen soveltuisi tornimittaus, jossa voitaisiin paremmin kontrolloida tutkan mittaamaa kohdetta sekä tehdä helposti mittauksia useammalla eri mittauskulmalla.

Luku 7

Yhteenveto

Tässä työssä on esitelty Tuusulan koealueella vuosina 2002-2005 tehty EnviSnow-projektiin liittyvä HUTSCAT-lentomittauskampanja ja sen tuloksia. Tulosten perusteella voidaan todeta, että:

- C- ja X-alueella HH- tai VV-polarisaatiolla tehtävä tutkimittaus soveltuu yleisen lumitilanteen tarkkailuun Etelä-Suomessa.
- Sulamiskauden alkaminen aiheuttaa yhdensuuntaispolarisaatiolla mitattuun sirontakertoimeen σ^0 noin 1-3 dB pienenemisen.
- X-alue soveltuu hieman C-aluetta paremmin lumipeitteen mittaamiseen.
- Kuivan ja kostean lumen lämpötilan, vesiarvon tai deformaation ei havaittu vaikuttavan mitattuun sirontakertoimeen.
- Kuivan ja kostean lumen alla olevan maan lämpötilan ja yhdensuuntaispolarisaatiolla mitatun sirontakertoimen σ^0 välillä havaittiin kohtalainen negatiivinen korrelaatio.
- Etelä-Suomelle tyypillisissä keskitalven lumiolosuhteissa lumen alla oleva maa vaikuttaa enemmän mitattuun sirontakertoimeen kuin lumi.
- Ristipolarisaatiolla mitattuun sirontakertoimeen vaikuttaa eniten puusto.

Tehdyt mittaukset vahvistivat aikaisempia tuloksia siitä, että lumen kostuminen ja sulamiskauden alku voidaan havaita tutkalla. Sulamiskauden aiheuttama sirontakertoimen pieneneminen havaittiin X-alueen yhdensuuntaispolarisaatiolla kaikilla mitatuilla maastotyypeillä. Lumen muuttuminen kuivasta märäksi havaittiin myös alueella, joilla lumipeitettä mitattiin metsän läpi. Sirontakertoimen pieneneminen oli selvempää X-alueella kuin C-alueella, mikä vahvistaa aiempaa tulosta, jonka mukaan X-alue soveltuu C-aluetta paremmin lumen kaukokartoitukseen.

Maanpinnan lämpötilan ja mitatun sirontakertoimen välillä havaittiin korrelaatiota, mutta vastaavaa korrelaatiota lumen ominaisuuksien — lämpötilan, vesiarvon tai lumen deformaation — sekä mitatun sirontakertoimen välillä ei havaittu. Tästä voidaan päätellä, että Etelä-Suomelle tyypillisissä olosuhteissa, joissa maassa on verrattain ohut, kuiva tai melkein kuiva lumipeite, maan ominaisuuksilla on suurempi vaikutus sirontakertoimeen kuin lumipeitteellä.

Negatiivinen korrelaatio maan lämpötilan ja sirontakertoimen välillä on mielenkiintoinen tulos, jonka selittämiseen tarvitaan jatkotutkimuksia. Mahdollisissa tulevilla mittauskampanjoissa kannattaa kiinnittää lumipeitteen alla olevaan maahan erityistä huomiota. Maanpinnan lämpötilan lisäksi kannattaa kiinnittää huomiota myös muihin maanpinnan ja lumen rajapinnan ominaisuuksiin.

Mitattujen sirontakertoimien havaittiin olevan pienempiä suurempaa mittauskulmaa käytettäessä. Mittauskulman vaikutuksen tarkempi analysointi on vaikeaa osaksi sen takia, että mittauksia tehtiin vain kahdella eri mittauskulmalla, ja osaksi mittausjärjestelystä aiheutuvien virhelähteiden takia.

Samaan aikaan HUTSCAT-mittausten kanssa mitattiin Tuusulan koealueella myös radiometreillä sekä optisen alueen spektrometrillä. HUTSCATin mittaamien sirontakerrointen yhdistäminen näiden mittausten tuloksiin voisi auttaa nykyistä tehokkaampien multisensorimenetelmien kehittämisessä. Tässä työssä käytettyjä mittauksia voitaneen käyttää muuhunkin kuin lumen kaukokartoituksen kehittämiseen, esimerkiksi metsän tai viljelyskasvien tutkasironnan mallintamisen kehittämiseen.

Lähdeluettelo

- [1] Robinson David A.; Dewey Kenneth F.; Heim Richard R. Jr. Global Snow Cover Monitoring: An Update, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 74, No. 9, pp. 1689-1696, 1993.
- [2] Weller G. Impacts of Climate Change in the Arctic, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International Volume 1, pp 171 - 173 vol 1, 2001.
- [3] Barnett T.P.; Dümenil L.; Schlese U.; Roeckner E.; Latif M. The Effect of Eurasian Snow Cover on Regional and Global Climate Variations, Journal of the Atmospheric Sciences Vol. 46, Issue 5, pp 661-686, 1989.
- [4] Development of Generic Earth Observation Based Snow Parameter Retrieval Algorithms EnviSnow Description of Work, EESD-Programme, 2001.
- [5] Klemola Olli; Lehto Arto. Tutkatekniikan perusteet. Otatieto Oy, 1998.
- [6] Fung Adrian K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications, Artech House, 1994.
- [7] Mäkynen Marko. Lentokäyttöisen sirontamittarin mittaustarkkuuden analysointi. Diplomityö, Teknillisen korkeakoulun avaruustekniikan laboratorio, 1994.
- [8] Ulaby Fawwaz T.; Moore Richard K.; Fung Adrian K. Microwave Remote Sensing, Active and Passive Volume II. Reading, Addison Wesley, 1982.
- [9] Ulaby Fawwaz T.; Moore Richard K.; Fung Adrian K. Microwave Remote Sensing, Active and Passive Volume III. Reading, Addison Wesley, 1986.
- [10] Räisänen Antti; Lehto Arto. Radiotekniikan perusteet. Otatieto Oy, 10. uudistettu painos, 2001.
- [11] Martti E. Tiuri; Ari H. Sihvola; Ebbe G. Nyfors; Martti T. Hallikainen. The Complex Dielectric Constant of Snow at Microwave Frequencies, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-9, No. 5, December 1984.

- [12] Hallikainen Martti; Ulaby Fawwaz; Abdelrazik Mohamed. Dielectric Properties of Snow in the 3 to 37 GHz Range, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. AP34, NO. 11 pp. 1329-1340, 1986.
- [13] Kendra John R; Sarabandi Kamal; Ulaby Fawwaz T. Radar Measurements of Snow: Experiment and Analysis, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 3, May 1998.
- [14] Shi Jiancheng; Dozier Jeff. Estimation of Snow Water Equivalenve Using SIR-C/X-SAR, Part II: Inferring Snow Depth and Patricle Size, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 38, No 6, November 2000.
- [15] Magagi R; Bernier M. Optimal conditions for wet snow detection using RADARSAT SAR data, Remote Sensing of Environment, volume 84, Issue 4, pp 612, 2003.
- [16] Koskinen Jarkko. Snow Monitoring Using Microwave Radars. Thesis for the degree of Doctor of Technology. Helsinki University of Technology Laboratory of Space Technology, Report 44, 2001.
- [17] Hyyppä Juha. Monikanavainen FFT-sirontamittari. Lisensiaattityö, Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratorio, 1990.
- [18] Hyyppä Juha; Hallikainen Martti. Forest applications of a helicopter-borne 8-channel ranging scatterometer, Helsinki University of Technology, Laboratory of Space Technology Report 5, 1991.
- [19] Mäkynen Marko; Hallikainen Martti. Feasibility of microwave remote sensing for classification of the Baltic Sea ice, Helsinki University of Technology, Laboratory of Space Technology Report 38, 1999.
- [20] Ville Jääskeläinen. Lumen kaukokartoitus mikroaaltotutkalla. Lisensiaattityö, Teknillisen korkeakoulun Avaruustekniikan laboratorio 1993.
- [21] Martti Hallikainen,; Juha Hyyppä,; Juhani Haapanen,; Teemu Tares,; Pekka Ahola,; Jouni Pulliainen,; Martti Toikka. A Helicopter-Borne Eight-Channel Ranging Scatterometer for Remote Sensing: Part I: System Description, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 31, No. 1, January 1993.
- [22] Martti Kemppinen. Kaukokartoitustutkien kiinnitysteline II, Teknillinen korkeakoulu Avaruustekniikan laboratorio Raportti 3, 17.11.1989.
- [23] Hallikainen M.; Mäkynen M.; Pulliainen J.; Vänskä T. Radar Backscatter from Boreal Forest in Winter, Proceedings of IGARSS'97, Singapore, pp. 803-805, 1997.
- [24] Jarkko T. Koskinen; Jouni T. Pulliainen; Marko P. Mäkynen; Martti T. Hallikainen. Seasonal Comparison of HUTSCAT Ranging Scatterometer and ERS-1 SAR Microwave Signatures of Boreal Forest Zone, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 37, No. 4, July 1999.

- [25] Shi Jiancheng; Dozier Jeff; Rott Helmut. Modeling and Observation of Polarimetric SAR Response to Dry Snow. Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '93. 'Better Understanding of Earth Environment' 18-21 Aug. 1993 pp 1042 - 1045.